

## Automated laminography system for inspection of electronics

**Publication number:** DE3854865T

**Publication date:** 1996-06-13

**Inventor:** BAKER BRUCE (US); COREY ROBERT (US); ADAMS JOHN (US); ROSS EDWARD (US)

**Applicant:** FOUR PI SYSTEMS CORP (US)

**Classification:**

**- International:** G01N23/18; G01B15/00; G01N23/04; G01R31/00; G01R31/302; G01R31/304; G01B15/00; G01N23/02; G01R31/00; G01R31/28; (IPC1-7): G01N23/02

**- european:** G01N23/04C; G01R31/302; G01R31/304

**Application number:** DE19883854865T 19881004

**Priority number(s):** US19870115171 19871030; WO1988US03423 19881004

**Also published as:**

WO8904477 (A1)  
EP0355128 (A1)  
US4926452 (A1)  
EP0355128 (A4)  
EP0355128 (A0)

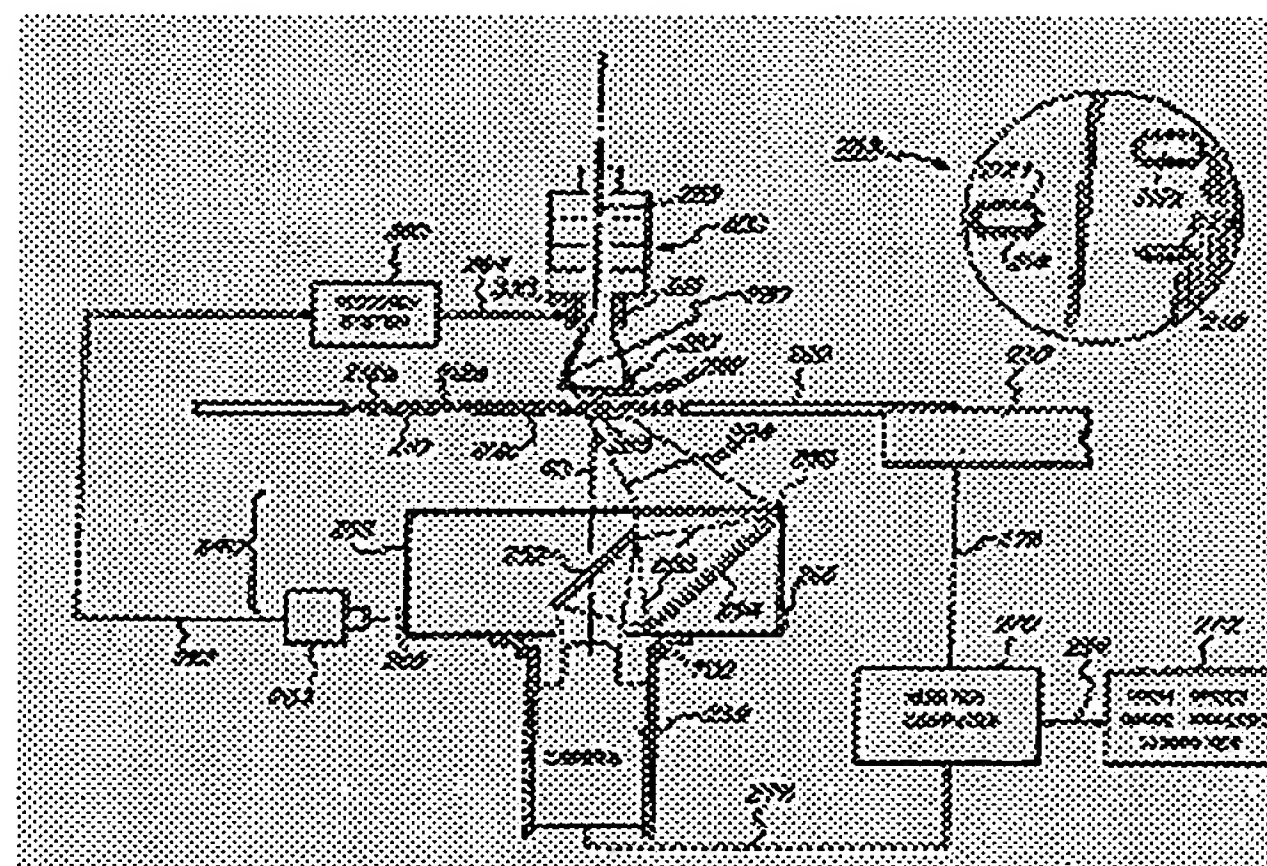
more >>

[Report a data error here](#)

Abstract not available for DE3854865T

Abstract of corresponding document: **US4926452**

A tomographic inspection system wherein the electron beam of a microfocus X-ray tube is deflected in a circular scan pattern onto the tube anode in synchronization with a rotating detector that converts the X-ray shadowgraph into an optical image and derotates the image so as to be viewed and integrated in a stationary video camera. A computer system controls an automated positioning system that supports the item under inspection and moves successive areas of interest into view. In order to maintain high image quality, a computer system also controls the synchronization of the electron beam deflection and rotating optical system, making adjustments for inaccuracies of the mechanics of the system. The computer system can also operate under program control to automatically analyze data, measure characteristics of the item under inspection and make decisions regarding the acceptability of the item's quality. The invention produces high resolution images in rapid succession so as to be suitable for use in conjunction with manufacturing production lines and capable of inspecting electronic devices, solder connections, printed wiring boards and other assemblies.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

⑤① Int. Cl.<sup>8</sup>:  
G 01 N 23/02

⑧⑦ EP 0 355 128 B1

⑩ DE 38 54 865 T 2

②① Deutsches Aktenzeichen:	38 54 865.8
⑧⑥ PCT-Aktenzeichen:	PCT/US88/03423
⑧⑥ Europäisches Aktenzeichen:	88 909 919.8
⑧⑦ PCT-Veröffentlichungs-Nr.:	WO 89/04477
⑧⑥ PCT-Anmeldetag:	4. 10. 88
⑧⑦ Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung:	18. 5. 89
⑧⑦ Erstveröffentlichung durch das EPA:	28. 2. 90
⑧⑦ Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	3. 1. 96
④⑦ Veröffentlichungstag im Patentblatt:	13. 6. 96

③⑩ Unionspriorität: ③② ③③ ③①  
30.10.87 US 115171

⑦③ Patentinhaber:  
Four pi Systems Corp., San Diego, Calif., US

⑦④ Vertreter:  
Hoefer, Schmitz, Weber, 82031 Grünwald

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:  
AT, BE, CH, DE, FR, GB, IT, LI, LU, NL, SE

⑦② Erfinder:  
BAKER, Bruce, D., Olivenhain, CA 92024, US;  
COREY, Robert, L., San Diego, CA 92129, US;  
ADAMS, John, A., Escondido, CA 92025, US; ROSS,  
Edward, W., Escondido, CA 92026, US

⑤④ SELBSTTÄTIGES LAMINOGRAPHIE-SYSTEM ZUR INSPEKTION VON ELEKTRONIKA

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 38 54 865 T 2

DE 38 54 865 T 2

EP 88909919.8

FPS881001PDE-5/kw

Four PI Systems Corporation

### **Beschreibung**

Die Erfindung betrifft im allgemeinen eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Prüfen elektrischer Verbindungen zwischen elektrischen Bauteilen auf Leiterplatten. Die Erfindung ist insbesondere bei einem computergesteuerten Laminographie-System für eine schnelle, hochauflösende Prüfung von hergestellten elektronischen Gegenständen einsetzbar.

### **Hintergrund der Erfindung**

Schnelle und präzise Qualitätskontrollprüfungen der Verlötung und des Zusammenbaus von elektronischen Vorrichtungen sind heutzutage vorrangige Kriterien in der Elektronik-Herstellungsindustrie. Die verringerte Größe der Bauteile und Lötverbindungen, die resultierende erhöhte Bauteiledichte auf Leiterplatten und der Beginn der Oberflächen-Befestigungstechnologie (SMT), bei welcher Lötverbindungen unter Vorrichtungsgehäusen bzw. Vorrichtungsanordnungen positioniert werden, so daß sie vor Blickkontakt geschützt sind, haben die Durchführung schneller und präziser Überprüfungen von elektronischen Vorrichtungen und den elektronischen Verbindungen zwischen Vorrichtungen in der Umgebung von Produktionsstätten erheblich erschwert.

Viele bestehende Prüfungssysteme setzen durchdringende bzw.

durchgehende Strahlung bei elektronischen Vorrichtungen und Verbindungen ein, um Bilder mit Merkmalen zu erzeugen, welche die Innenanordnung bzw. das Innengefüge der Vorrichtungen und Verbindungen darstellen. Diese Verfahren verwenden oftmals herkömmliche röntgenographische Verfahren, wobei die durchdringende Strahlung Röntgenstrahlen aufweist. Medizinische Röntgenbilder verschiedener menschlicher Körperteile, wie etwa der Brust, der Arme, der Beine, der Wirbelsäule etc. sind vermutlich die geläufigsten Beispiele herkömmlicher röntgenographischer Bilder. Die erzeugten Bilder und Aufnahmen zeigen den Röntgenstrahl-Schatten, welcher durch ein zu prüfendes Objekt bzw. einen zu prüfenden Gegenstand erzeugt wird, wenn er mit einem Röntgenstrahl bestrahlt wird. Der Röntgenstrahl-Schatten wird erfaßt und durch ein röntgenstrahl-empfindliches Material, wie etwa einem Film oder einer anderen geeigneten Einrichtung, aufgezeichnet.

Die Erscheinung des Röntgenstrahl-Schattens oder Radiogramms bzw. der Röntgenaufnahme wird nicht ausschließlich durch die Innengefüge-Eigenschaften bzw. Charakteristika des Objekts sondern auch durch die Richtung bestimmt, aus welcher die einfallenden Röntgenstrahlen auf das Objekt auftreffen. Somit erfordert eine komplette Interpretation und Analyse des Röntgenstrahl-Schattenbildes, ob visuell durch eine Person oder numerisch durch einen Computer ausgeführt, oftmals bestimmte Annahmen, welche die Eigenschaften des Objektes und dessen Ausrichtung bezüglich des Röntgenstrahles betreffen. Beispielsweise ist es oftmals erforderlich, spezielle Annahmen zu treffen, welche die Form, die innere Struktur, etc. des Gegenstandes und die Richtung der einfallenden Röntgenstrahlen auf das Objekt betreffen. Basierend auf diesen Annahmen können Merkmale des Röntgenstrahles analysiert werden, um die Position, Größe, Form, etc. der entsprechenden Gefügeeigenschaft des Objektes, etwa einen Lötverbindungsdefekt, zu bestimmen, welcher das Bildmerkmal erzeugte. Diese Annahmen schaffen oftmals Unklarheiten bzw. Zweideu-



tigkeiten, welche die Verlässlichkeit der Bildinterpretation und der auf der Analyse der Röntgenstrahl-Schattenbilder basierenden Entscheidungen herabsetzen. Eine der Hauptunklarheiten, welche aus dem Einsatz derartiger Annahmen bei der Analyse herkömmlicher Radiogramme resultiert, besteht darin, daß kleine Veränderungen einer Struktureigenschaft innerhalb eines Objektes oftmals durch die Überschattungsmasse bzw. -volumen der Lötverbindung per se, als auch durch benachbarte Lötverbindungen, Elektronikvorrichtungen, Leiterplatten und andere Gegenstände verdeckt werden. Da sich die Überschattungsmassen und benachbarten Objekte normalerweise für jede Lötverbindung unterscheiden, ist es extrem schwer und oftmals unmöglich ausreichende Annahmen zu treffen, um die Formen, Größen und Orte von Lötstellendefekte innerhalb einzelner Lötverbindungen präzise zu bestimmen.

Um diese Nachteile zu kompensieren sehen einige Systeme die Möglichkeit vor, den Gegenstand aus einer Vielzahl von Winkeln zu betrachten bzw. abzutasten. Die zusätzlichen Ansichten ermöglichen diesen Systemen eine Teilauflösung der Unklarheiten, welche bei den Röntgenstrahlschatten-Projektionsbildern vorliegen. Jedoch erfordert die Verwendung von einer Vielzahl von Betrachtungswinkeln ein kompliziertes mechanisches Handhabungssystem, welches oftmals nicht weniger als fünf unabhängiger, nicht orthogonaler Bewegungsachsen bedarf. Dieser mechanische Kompliziertheitsgrad führt zu erhöhten Kosten, erhöhter Größe und erhöhtem Gewicht, längeren Prüfzeiten, verringertem Durchsatz, verminderter Positionierungspräzision aufgrund der mechanischen Verkomplizierung und zu Kalibrierungs- und Computersteuerungskomplikationen, aufgrund der nichtorthogonalen Bewegungsachsen.

Viele der oben diskutierten und den herkömmlichen Radiographieverfahren zugeordneten Probleme können dadurch erleichtert werden, daß Querschnittsbilder des geprüften Objektes erzeugt werden. Tomographieverfahren, wie etwa die Lamino-graphie und die Computertomographie (CT) werden oftmals bei

medizinischen Anwendungen eingesetzt, um Querschnitts- oder Körperschnitt-Bilder zu erzeugen. Bei medizinischen Anwendungen wurden diese Verfahren mit weit verbreitetem Erfolg in großem Umfang eingesetzt, da eine relativ niedrige Auflösung in der Größenordnung von 1 - 2 mm (0,04 bis 0,08 Inches) ausreicht und da die Geschwindigkeits- und Durchsatzanforderungen nicht so schwerwiegend sind, wie die entsprechenden Industrieanforderungen. Jedoch konnte kein Laminographie-Prüfsystem bisher mit kommerziellem Erfolg bei einer industriellen Anwendung aufgrund der Prüfpräzisions- und/oder Prüfgeschwindigkeits-Nachteile eingesetzt werden. Dies resultiert daraus, daß bestehende Laminographie-Systeme die hohen Positionsgenauigkeiten und Bildauflösungen nicht erreichen können, welche zum Lösen industrieller Prüfprobleme bei den erforderlichen Geschwindigkeiten notwendig sind, um in einer Produktionsstätte einsetzbar zu sind.

Bei der Elektronikprüfung und insbesondere bei der Prüfung von elektronischen Verbindungen, wie etwa Lötverbindungen, ist eine Bildauflösung in der Größenordnung von mehreren Mikrometern, etwa 20 Mikrometern (0,008 inch.) erforderlich. Zudem muß ein industrielles Prüfsystem für Lötverbindungen mehrere Bilder pro Sekunden erzeugen, um für die Verwendung in einer Fertigungsstraße geeignet zu sein. Bisher waren Laminographie-Systeme nicht geeignet diese Geschwindigkeits- und Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen, welche bei der Elektronikprüfung erforderlich sind.

Laminographie-Systeme für die Erzeugung von Querschnittsbildern weisen mittlerweile verschiedene Gestaltungsformen auf. Ein System ist in dem US-Patent No. 3,928,769 mit dem Titel "LAMINOGRAPHIC INSTRUMENT" beschrieben. Die darin beschriebene Strahlungsquelle und der Detektor sind mechanisch gekoppelt, um die erforderliche Geometrie und synchronisierte Bewegung der Quelle und des Detektors zu erreichen. Dieses System hat den Nachteil, daß das relativ hohe Gewicht einer bestimmten Kombination aus Elementen mit hohem Gewicht,

welche die bei der Prüfung gegenständliche Strahlungsquelle aufweisen und der Detektor bewegt werden müssen. Dies ist insbesondere schwierig, wenn Röntgenstrahlröhren und eine Kameraausrüstung verwendet werden. Die Geschwindigkeit dieses Systems ist stark eingeschränkt, da es sehr schwierig ist, diese relativ hohen Gewichte schnell und präzise zu bewegen. Dieses System weist zudem Auflösungsgrenzen auf, welche durch die Ungenauigkeit und dem Alterungsverschleiß der vielen komplizierten Bewegungsteile erhalten werden.

Bei einem weiteren im US-Patent No. 4,211,927 beschriebenen System mit dem Titel "COMPUTERIZED TOMOGRAPHY SYSTEM", werden die mechanischen Bewegungen der Strahlungsquelle und des Detektors elektronisch durch getrennte Schrittmotoren angetrieben, deren zeitlicher Ablauf durch den gleichen Computer gesteuert wird. Die Bewegung jedes Bauteils wird in Referenz mit einer jeweiligen vorgegebenen zentralen Kalibrierungsposition durchgeführt. Somit besteht keine direkte Verbindung, welche die Position der Quelle mit der Position des Detektors koreliert, obwohl die Quelle und der Detektor durch den gleichen Computer angetrieben werden. Die Wirkungsweise dieses Systems ist in der Geschwindigkeit eingeschränkt, bei welcher die massige Strahlungsquelle und der Detektor schwingen können und es ist zudem in der Präzision, der Synchronisation und der Stabilität der Bewegungsteile eingeschränkt.

Bei dem US-Patent No. 4,516,252 mit dem Titel "DEVICE FOR IMAGING LAYERS OF A BODY" wird eine Vielzahl von Strahlungsquellen, von denen jede im Raum an einer unterschiedlichen Position befestigt ist, anstelle einer einzelnen oszillierenden Quelle verwendet. Die Position eines Bilddetektors wird elektronisch synchronisiert mit der Aktivierung der Vielzahl an Quellen bewegt. Während diese Annäherung die Probleme eliminiert, welche der mechanischen Bewegung der Strahlungsquelle und des Detektors zu eigen sind, weist diese Annäherung den für die erforderliche Vielzahl von

Strahlungsquellen resultierenden Kostennachteil auf. Die resultierende Bildqualität wird zudem herabgesetzt, da das erwünschte Verschwimmen von Fokusmerkmalen nicht kontinuierlich, sondern eher beliebig auftritt, aufgrund einer endlichen Anzahl an Strahlungsquellen-Positionen. Somit verbleiben unerwünschte Merkmale, als Faktenvielzahl, im Bild.

Das US-Patent No. 2,667,585 mit dem Titel "DEVICE FOR PRODUCING SCREENING IMAGES OF BODY SECTIONS" zeigt eine stationäre Röntgenröhre, wobei die Strahlungsquellenbewegung durch die elektrostatische Ablenkung des Elektronenstrahls in der Röntgenröhre bewirkt wird, wodurch der Elektronenstrahl einen Weg aus der Oberfläche einer flachen Ziel- bzw. Aufnahmeanode aufträgt. Der Röntgenstrahlröhre bzw. Röntgenröhre liegt ein Detektorbildrohr gegenüber, welches eine Elektronenoptik aufweist, die das resultierende Elektronenbild auf einen stationären Detektor ablenkt. Der Ablenkungsschaltkreis der Röntgenröhre und der Ablenkungsschaltkreis der Bildröhre werden von der gleichen Spannungsversorgung angetrieben, so daß die Bewegung der Röntgenquelle und die Ablenkung des resultierenden Bildes im Detektor simultan angetrieben werden. Dieses System vermeidet somit viele der der mechanischen Bewegung der Strahlungsquelle und des Detektors zugeordneten Nachteile. Jedoch kann dieses System die Fokussierung und Energie des Elektronenstrahls nicht durchweg beibehalten, da der Strahl über die Ziel-Oberfläche geschwenkt wird. Hierdurch variiert der Röntgenstrahl-Brennpunkt sowohl in dessen Größe als auch in dessen Intensität, so daß die mit der Vorrichtung erreichbare Auflösung stark begrenzt wird. Die Verwendung einer Elektronenoptik, um das Elektronenbild abzulenken, beschränkt zudem die mit dieser Vorrichtung erzielbare Erfassungs-Auflösung. Dieses Problem ist insbesondere ernst zu nehmen, wenn das Bild über große Winkel abgelenkt wird. Analog geht die Positionierungsgenauigkeit des Röntgenstrahl-Brennpunktes verloren, wenn der Strahl mit spitzen Winkeln abgelenkt wird. Diese Eigenschaften begrenzen die mit diesem Verfahren erreichbare

Auflösung wesentlich. Zudem ist dieses Verfahren lediglich für den Betrieb innerhalb eines relativ kleinen Bereiches von Betrachtungswinkeln anwendbar, was den erwünschten laminographischen Verschwimmungseffekt der unerwünschten Merkmale begrenzt und folglich die Auflösung in einer zur Fokussierungsebene senkrechten Richtung einschränkt.

Die oben beschriebenen Laminographie-Systeme sind alle auf die Durchführung von Körperschnitt-Radiographien gerichtet und als solche nicht zum Erzeugen hochauflösender Bilder in schneller Aufeinanderfolge ausgestaltet. Zudem müssen derartige Systeme weder in einem kontinuierlichen Arbeitszyklus noch in einer Umgebung arbeiten, welche mit der Herstellung der Elektronik (-Bauteile) kompatibel ist.

Anerkannterweise wird in der EP-A-0236001 ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Messen von Gefügeeigenschaften einer hergestellten Leiterplatte durch automatisierte Real-Zeit Radiographieverfahren offenbart. Röntgenstrahlen sind bei der Prüfung auf eine Leiterplatte gerichtet. Die durch die Leiterplatte übertragenen Röntgenstrahlen werden auf ein Röntgenstrahl-Bildsystem gerichtet, um ein Röntgenstrahl-Schattenzeigerbild zu erzeugen. Das Röntgenstrahl-Bildsystem wandelt anschließend die übertragenen Röntgenstrahlen in digitale Bilder um, welche die radiographische Dichte des Leiterplattenbereiches bei der Prüfung darstellen. Die digitalen Bilder werden anschließend innerhalb eines digitalen Bildprozessors abgespeichert. Basierend auf diesen Bildern liefert ein Computer die Struktureigenschaften der Lötverbindungen und Bauteile auf der Leiterplatte.

Ferner ist aus US-A-2998518 bekannt ein Multi-Spiegel Drehdetektorsystem in einer Vorrichtung mit einer Strahlungsquelle und einem Empfänger zu schaffen, welche aus einem fluoreszierenden Bildschirm besteht. Ein optisches System projiziert ein Bild auf den fluoreszierenden Bildschirm auf der Photokathoden-Oberfläche eines Bildverstärkers, welcher



auf der Drehachse der Vorrichtung angeordnet ist. Die Bereiche des optischen Systems, welche zur Bilderzeugung dienen, werden auch auf der optischen Achse positioniert und der Lateralversatz zwischen den Achsen des fluoreszierenden Bildschirms und der Photokathode des Bildverstärkers kann durch zwei drehende Spiegel realisiert werden, welche in einem Winkel mit Bezug auf die Achsen angeordnet sind, so daß die Lichtstrahlen vom Bildschirm auf die Photokathode reflektiert werden.

Ein Artikel von James F. Blanche mit dem Titel "Nondestructive Testing Techniques For Multilayer Printed Wiring Boards"; veröffentlicht in der Zeitschrift PROCEEDINGS OF THE SECOND TECHNOLOGY STATUS AND TRENDS SYMPOSIUM 1967 von NASA (SP-5082), Seiten 1-13; beschreibt ein laminographisches Prüfsystem für die Prüfung von Mehrschicht-Leiterplatten. Die Mehrschicht-Leiterplatten umfassen eine Anzahl an verkupferten Schichten, auf welche verschiedene Schaltkreismuster aufgeätzt sind. Die Schichten werden miteinander laminiert und Löcher durch die laminierte Anordnung an Punkten gebohrt, an denen Verbindungen zwischen benachbarten Schichten ausgebildet werden. Das von Blanche angesprochene Problem besteht in dem Ausrichten benachbarter Schichten einer Mehrschicht-Leiterplatte, um zu gewährleisten, daß gute elektrische Verbindungen zwischen verschiedenen Schichten ausgeführt werden. Verschiedene Versuche die Lehre von Blanche auf das Prüfproblem elektrischer Verbindungen zwischen elektrischen Bauteilen zu übertragen, welche auf den Leiterplatten befestigt sind, sind fehlgeschlagen, so daß die Laminographie als Versuchsverfahren für derartige Prüfungen schließlich verworfen wurde.

Viele der aufgefundenen Nachteile bei den momentan verwendeten Elektronik-Prüfsystemen können durch ein hochauflösendes Hochgeschwindigkeit-laminographisches Prüfsystem überwunden werden. Ein derartiges System wäre insbesondere für die Prüfung von elektrischen Verbindungen, wie etwa Lötverbin-

dungen bei elektronischen Anordnungen geeignet. Ein hochauflösender Laminograph einer Lötverbindung sollte unzweifelhaft Merkmale der Lötverbindung enthüllen, welche die Verbindungsqualität aufzeigen. Unglücklicherweise haben bekannte Systeme deutlich eine optimale Ausführbarkeit verfehlt, aufgrund der schlechten Bildauflösung oder wahrscheinlich langen Prüfzeit oder aufgrund von beiden. Die bisher verwendeten Verfahren zum Verbessern der Auflösung resultierten unabwiegend in langen Prüfzeiten. Analog haben früher verwendete Verfahren, welche die Prüfzeit reduzieren sollten, im allgemeinen zu einem Verzicht in der Bildauflösung geführt. Es besteht somit ein Bedarf an einem Hochgeschwindigkeits-, hochauflösenden, industriellen Laminographie-System, welches Elektronik in industriellen Umgebungen prüfen kann.

Entsprechend schafft die vorliegende Erfindung eine Vorrichtung gemäß dem Anspruch 1 zum Prüfen elektrischer Verbindungen und ein entsprechendes Verfahren gemäß Anspruch 39.

Die Erfindung erzeugt Querschnittsbilder der Verbindungen, welche anschließend durch ein computergestütztes Bildanalyserungssystem analysiert werden. Bei bevorzugten Ausführungsbeispielen werden die Querschnittsbilder automatisch analysiert, um Defekte in den Verbindungen zu identifizieren und lokalisieren und um Verfahrenseigenschaften der Verbindungen zu bestimmen. Ein Bericht der Bildanalyse, welcher die Position und den Typ des Defektes oder die Verfahrenseigenschaft charakterisiert, wird angefertigt und dem Benutzer präsentiert.

Die Erfindung ist in Form eines automatisierten laminographischen Prüfsystems für Lötverbindungen auf gedruckten verdrahteten Plattenanordnungen und anderen elektronischen Vorrichtungen und Anordnungen verwendbar. Eine zentrale Datenverarbeitung und Steuereinheit positioniert die zu prüfenden Gegenstände, steuert die Ausbildung der laminographischen

Bilder, analysiert die Bilddaten, entscheidet aufgrund der Charakteristika und Akzeptabilität des geprüften Gegenstandes, basierend auf der Analyse der Bilddaten, und führt die Ergebnisse des Prüfvorganges dem Benutzer zu.

Dieses Prüfsystem hat mehrere wesentliche Vorteile gegenüber alternativen Systemen und Verfahren. Demzufolge ist dessen Wirksamkeit denen der alternativen Systeme und Verfahren bevorzugt, teilweise aufgrund der hohen Auflösung der Bilder, des Querschnittsformats der Bilder und der automatisierten schnellen Erfassung und Analysierung der Bilder.

Das System verwendet vorteilhafterweise die Röntgenstrahl-Laminographieverfahren, um hochauflösende Querschnittsbilder zu erzielen. Das System setzt kreisförmige Bewegungen einer Strahlungsquelle und eines Detektors ein, um das laminographische Verschwimmen von Artefakten zu optimieren, ohne daß auf nicht notwendige komplexe Bewegungen zurückgegriffen wird. Eine präzise kreisförmige Drehung der Strahlungsquelle wird dadurch bedingt, daß der Elektronenstrahl innerhalb einer stationären Röntgenstrahlröhre einen kreisförmigen Weg auf der Anode der Röntgenstrahlröhre umschreibt, wodurch der Drehung der Strahlungsquelle zugeordnete Bewegungsteile ausgeschlossen werden. Die Drehung des Detektors stellt die einzige mechanische Bewegung dar, welche zum Erzeugen des laminographischen Bildes erforderlich ist. Ein kalibriertes Rückkopplungssystem verbessert die Präzision des Systems weiter, indem Ungenauigkeiten der mechanischen Systembauteile kompensiert werden, welche die Ausrichtung und die Synchronisation der drehenden Röntgenstrahlquelle und des Röntgenstrahldetektors während der Ausbildung der laminographischen Bilder beeinflussen. Das Rückkopplungssystem koordiniert die Detektorposition mit der Röntgenstrahlquellenposition, so daß die kontinuierliche und genaue Ausrichtung der Quelle und des Detektors während der Gewinnung der Bilder sichergestellt wird.

Das hochauflösende Hochgeschwindigkeits-laminographische Prüfsystem erzeugt hochauflösende Querschnittsbilder der Lötverbindungen, elektronischen Vorrichtungen und anderer Anordnungen, während hohe Prüfgeschwindigkeiten in der im folgenden dargestellten Art beibehalten werden. Die rotierende Röntgenstrahlquelle und der rotierende Detektor erzeugen ein rotierendes Röntgenstrahl-Schattenzeigerbild, welches auf einen fluoreszierenden Schirmdetektor auftrifft, der das Röntgenstrahlbild in ein sichtbares Lichtbild umwandelt. Die Drehung der Röntgenstrahlquelle wird elektronisch erreicht, so daß Ungenauigkeiten und komplizierte mechanische Mechanismen eliminiert werden. Der fluoreszierende Schirm ist auf einem Drehtisch angeordnet, welcher der rotierenden Röntgenstrahlquelle gegenüberliegend positioniert ist. Der Schirm dreht sich in einer Ebene, welche parallel zur durch den geometrischen Ort bzw. Locus der rotierenden Röntgenstrahlquelle definierten Ebene ist, und dreht sich um eine gemeinsame Rotationsachse mit der Röntgenstrahlquelle. Zudem ist auf dem Drehtisch eine zwei Spiegel aufweisende De-Rotationsanordnung befestigt, welche eine Aufnahme des Bildes auf dem fluoreszierenden Schirm durch eine stationäre Kamera ermöglicht. Somit stellt die einzige mechanische Bewegung, welche zum Ausbilden eines Querschnittsbildes erforderlich ist, die Drehung des Drehtisches dar, welcher mit einer konstanten Geschwindigkeit drehbar ist, so daß der mechanische Aspekt des Systems vereinfacht wird.

Die Bildauflösung wird weiter verbessert, indem eine Mikrofokus-Röntgenstrahlquelle bei einer Anordnung eingesetzt wird, welche eine geometrische Vergrößerung des zu prüfenden Gegenstandes liefert.

Eine präzise Ausrichtung der Quelle und des Detektors tragen zudem zur Erzeugung hochauflösender Bilder bei und wird durch ein Rückkopplungssystem beibehalten. Das Rückkopplungssystem hält die präzise Ausrichtung des rotierenden Quellen-Brennpunktes und des fluoreszierenden Schirms bei,

indem die Ablenkungsschaltung des Elektronenstrahls innerhalb der Röntgenstrahlröhre synchronisiert mit der Position des rotierenden Drehtisches angetrieben wird. Dieses Rückkopplungsverfahren ermöglicht eine höhere Genauigkeit als bei bekannten Laminographie-Systemen, da in einem Speicher eine Koordinaten-Festlegungstabelle gespeichert ist, welche die genauen an die Ablenkungsschaltung der Röntgenstrahlquelle auszugebenden Signale, basierend auf der aktuellen Position des Drehtisches darstellt, welche durch den Präzisions-Positionskodierer bestimmt wird. Das Rückkopplungssystem akzeptiert von dem Positionskodierer Eingangsdaten, welche die Position des Drehtisches kennzeichnen, findet die entsprechenden Koordinaten aus der Festlegungstabelle auf und treibt die Ablenkungsschaltung der Röntgenstrahlröhre entsprechend an. Die Ausrichtung des Quellen-Brennpunktes und des Drehtisches wird periodisch in einer Prozedur kalibriert, welche eine geeignete Koordinaten-Festlegungstabelle erzeugt. Somit wird die Präzision des Laminographie-Systems entgegen Spiegelungenauigkeiten und Abweichungen der Drehgeschwindigkeit des Drehtisches, der Ausrichtung des Drehtisches, der Form der Zielanode und anderer kritischer Parameter beibehalten, welche die Prüfgeometrie bestimmen.

Die gedruckte Verdrahtungsplatte oder ein anderer zu prüfender Gegenstand wird auf einem mechanischen Handhabungssystem angeordnet, welches automatisch durch Computersteuerung betätigbar ist, um den Gegenstand derart zu bewegen, daß wahlweise die erwünschten Bereiche des Gegenstandes betrachtet bzw. erfaßt werden können.

Das hochauflösende Querschnittsbild der Lötverbindung, welches durch das Röntgenstrahl-Laminographie-System erlangt wird, wird automatisch analysiert. Ein leistungsstarkes Computersystem setzt eine parallele Verarbeitung ein, um wirkungsvoll und automatisch die Erfassung bzw. Erlangung eines Querschnittbildes der Lötverbindung zu steuern, um Bildeigenschaften zu messen, um die Eigenschaften mit speziellen



Typen an Lötdefekten zu korrelieren und um Entscheidungen hinsichtlich der Akzeptierbarkeit der Gegenstandsqualität entsprechend zu treffen. Die Ergebnisse der Bildanalyse werden an den Benutzer in irgendeiner von einer Vielzahl von Ausgabeformaten weitergeleitet.

Ein Aspekt des bevorzugten Systems besteht in einer Leiterplatten-Prüfvorrichtung zum Prüfen und Analysieren der Qualität der Lötverbindung zwischen einem elektrischen Bauteil und einer Leiterplatte, auf welche das Bauteil montiert ist. Die Leiterplatten-Prüfvorrichtung erzeugt röntgenstrahl-laminographische Querschnittsbilder der Lötverbindung. Die Bilder werden automatisch gewonnen, digitalisiert und analysiert. Die Leiterplatten-Prüfvorrichtung umfaßt eine Röntgenstrahlquelle, wobei die Röntgenstrahlen von einer Stelle auf einem Ziel emittiert werden, auf welches ein Elektronenstrahl auftrifft. Eine elektrische Steuereinrichtung lenkt den Elektronenstrahl zu unterschiedlichen Positionen auf dem Ziel bzw. dem Auffänger ab. Die Steuereinrichtung kann eine Rotation des Elektronenstrahls um eine Achse und ein Auftragen eines im wesentlichen kreisförmigen Weges auf den Auffänger bewirken, wodurch sich die Röntgenstrahlquelle in einem ersten kreisförmigen Muster bewegt. Das erste kreisförmige Muster definiert eine erste Ebene.

Die Leiterplatte-Prüfvorrichtung umfaßt ferner einen Röntgenstrahldetektor, welcher zum Empfangen von Röntgenstrahlen positioniert ist, die durch die Röntgenstrahlquelle erzeugt werden und welche die Lötverbindung und die Leiterplatte durchdrungen haben. Der Röntgenstrahldetektor umfaßt einen Wandlerschirm, welcher ein optisches Bild entsprechend einem Röntgenstrahlbild erzeugt, welches durch die hindurchgetretenen Röntgenstrahlen ausgebildet wird. Der Röntgenstrahldetektor umfaßt ferner eine Einrichtung für das Bewegen des Wandlerschirms derart, daß er um die Achse rotiert und entlang eines im wesentlichen kreisförmigen Weges wandert, welcher ein zweites kreisförmiges Muster definiert. Das

zweite kreisförmige Muster legt eine zweite Ebene fest, welche im wesentlichen parallel zur ersten Ebene ist. Der Röntgenstrahl-Detektor hat ferner eine Derotationseinrichtung, welche das optische Bild von dem rotierenden Wandler-  
schirm zu einer stationären optischen Bildebene überträgt, und umfaßt zudem eine Kamera, die an der stationären optischen Bildebene zum Erfassen des optischen Bildes angeordnet ist. Die Kamera weist einen elektronischen Ausgang auf, welcher dem optischen Bild entspricht.

Die Leiterplatten-Prüfvorrichtung umfaßt ferner ein Steuersystem zum synchronisieren der kreisförmigen Bewegungen der Röntgenstrahlquelle und des Wandlerschirms derart, daß die optischen Bilddarstellungen der Röntgenstrahlquerschnitt-Laminographischen Bilder an der stationären Bildebene ausgebildet werden. Das Steuersystem hat einen Sensor, welcher die Position des Wandlerschirmes entlang des zweiten kreisförmigen Musters aufzeichnet und der Schirmposition entsprechende Koordinaten überträgt. Das Steuersystem umfaßt ferner eine Festlegungstabelle, welche die Koordinaten von dem Sensor empfängt und entsprechende Signale zur Steuereinrichtung überträgt, so daß die Bewegung der Röntgenstrahlquelle mit der Bewegung des Wandlerschirmes bzw. Umformerbildschirmes synchronisiert wird.

Die Leiterplatten-Prüfvorrichtung ist zudem mit einem digitalen Bildverarbeitungssystem zum Analysieren der Querschnittsbilder der Lötverbindung ausgestaltet. Das Bildverarbeitungssystem umfaßt eine Bild-Digitalisierungseinrichtung zum Empfangen des elektronischen Bildsignals von der Kamera und zum Ausbilden einer digitalen Darstellung des Bildes, welche dem Röntgenstrahl-Querschnittsbild der Lötverbindung entspricht. Das Bildverarbeitungssystem hat ferner einen programmgesteuerten Computerabschnitt, welcher derart programmiert ist, daß er auf vorbestimmte Bereiche des digitalen Bildes zugreift und die Bereiche entsprechend vorbestimmt eingegebenen Instruktionen auf spezielle Merk-

male analysiert, welche spezielle Lötdefekttypen bzw. Löt-mitteldefekttypen darstellen.

Bei bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung weist die Röntgenstrahlquelle eine steuerbare bzw. lenkbare Elektronenstrahl-Röntgenstrahlröhre auf. Weiter bevorzugt umfaßt die elektrische Steuereinrichtung Spulen, welche magnetische Felder erzeugen, die mit dem Elektronenstrahl zusammenwirken, um ihn abzulenken. Bei einigen bevorzugten Ausführungsbeispielen hat der Wandlerschirm ein Cadmium-Wolframat-Szintillationsmaterial.

Vorzugsweise entspricht das Querschnittsbild einer Ebene innerhalb der Lötverbindung bzw. Lötmittelverbindung, welche zu der ersten und zweiten Ebene parallel ist und die Drehachse schneidet. Die Bildebene der Lötverbindung ist zwischen der Röntgenstrahlquelle und dem Röntgenstrahldetektor derart angeordnet, daß der Abstand von der Bildebene zur ersten Ebene geringer als der Abstand von der Bildebene zur zweiten Ebene ist.

Vorzugsweise umfaßt die Bewegungseinrichtung für den Wandlerschirm einen Drehtisch, welcher sich um die Achse dreht und auf welchem der Wandlerschirm befestigt ist. Die optische De-Rotationsvorrichtung umfaßt erste und zweite Spiegel, welche auf dem Drehtisch befestigt sind. Die Spiegel sind in einem Winkel von ungefähr  $45^\circ$  bezüglich der Drehachse und mit Bezug auf die ersten und zweiten Ebenen ausgerichtet. Der erste Spiegel empfängt das optische Bild vom Wandlerschirm und lenkt es zum zweiten Spiegel ab. Der zweite Spiegel lenkt das Bild weiter zur stationären Bildebene. Weiter bevorzugt schneidet der zweite Spiegel die Rotationsachse.

Bei besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen hat die Kamera eine Schwachlichtniveau-Videokamera. Die Schwachlichtniveau-Kamera umfaßt einen siliziumintensivierten

Zielbildverstärker. Zudem umfaßt das digitale Bildverarbeitungssystem ferner mehrere parallele Bildprozessoren.

Gemäß diesem Aspekt der Erfindung hat die Vorrichtung vorzugsweise einen Positioniertisch zum Bewegen der Leiterplatte.

Das Bildsystem umfaßt vorzugsweise eine Röntgenstrahlquelle und einen Röntgenstrahl-Detektor. Vorzugsweise erzeugt das Bildsystem Röntgenstrahl-Laminographen der elektrischen Verbindungen, welche durch die Bewegung der Röntgenstrahl-Quelle und des Röntgenstrahl-Detektors mit Bezug auf die elektrischen Verbindungen erzeugt werden. Die Bewegung der Röntgenstrahl-Quelle wird durch elektrische Elemente und die Bewegung des Röntgenstrahl-Detektors wird durch elektromechanische Elemente erzeugt. Die Röntgenstrahl-Quelle und die Röntgenstrahl-Detektor-Bewegungen werden durch ein elektrisches Rückkopplungssystem synchronisiert und gesteuert. Vorzugsweise sind die Bewegungen der Röntgenstrahl-Quelle und des Röntgenstrahl-Detektors im wesentlichen kreisförmig und definieren eine Quellenebene und eine Detektorebene. Bei besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen sind die Quellenebene und die Detektorebene im wesentlichen parallel.

Bei alternativen Ausführungsbeispielen der Erfindung umfaßt das Bildsystem ein computerisiertes Tomographiesystem.

Das System ist insbesondere in den Fällen nützlich, in denen die elektrischen Bauteile elektrische Verbindungselemente und die Leiterplatte elektrische Verbindungselemente aufweisen. Die elektrischen Verbindungen umfassen leitfähige (Bond-)Verbindungen zwischen den elektrischen Bauteile-Verbindungselementen und den Leiterplatten-Verbindungselementen. Beispielsweise können die elektrischen Verbindungen Lötverbindungen zwischen den elektrischen Bauteile-Verbindungselementen und den Leiterplatten-Verbindungselementen aufweisen.

Bei bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung sucht das Bildanalyzesystem nach speziellen Merkmalen der Querschnittsbilder. Das Bildanalyzesystem identifiziert die speziellen Merkmale, indem vorgegebene Tests an bzw. auf den Querschnittsbildern an vorgegebenen Bildpositionen ausgeführt werden. Beispielsweise kann eines der speziellen Merkmale einen Lötüberbrückungsdefekt aufweisen. Das Bildanalyzesystem berechnet eine Reihe von Intensitätsgraustufen bzw. Werten des Differenzialbildes entlang einer Grenze, welche die Lötverbindung umgibt, und vergleicht die Differenzialgrauwerte mit einem vorgegebenen Schwellengrauwert. Der Lötüberbrückungsdefekt wird durch das Bildanalyzesystem an Stellen entlang der Grenze identifiziert, wobei die berechneten Differenzial-Bildintensitätsgrauwerte den Schwellenwert übersteigen. Ein weiteres Beispiel für ein spezielles Merkmal stellt die an den Verbindungen vorliegende Quantität des Lötmittels dar. In diesem Beispiel legt das Bildanalyzesystem drei Bereiche des Querschnittbildes entsprechend drei unterschiedlichen Bereichen einer Lötverbindung fest, berechnet eine Durchschnittsbildintensität für jeden der drei Bereiche und vergleicht die Durchschnittsbildintensitäten mit einem ersten und einem zweiten Satz an vorgegebenen Schwellenwerten. Das Bildanalyzesystem identifiziert einen Defekt aufgrund von fehlenden Lötmittel an Positionen, an denen die Durchschnittsintensitäten geringer als sowohl der erste als auch der zweite Satz an Schwellenwerten ist. Alternativ identifiziert das Bildanalyzesystem einen unzureichenden Lötmitteldefekt an Stellen, an denen die Durchschnittsintensitäten geringer als der erste Satz an Schwellenwerten und größer als der zweite Satz an Schwellenwerten ist.

Eine Vorrichtung, welche zum Erzeugen von Röntgenstrahl-Laminographen eines Gegenstandes vorgesehen ist, umfaßt eine Röntgenstrahl-Quelle, wobei die Röntgenstrahlen durch einen Elektronenstrahl erzeugt werden, welcher auf ein Ziel auftrifft und durch eine elektrische Steuereinrichtung zum Ab-



lenken des Elektronenstrahls zu unterschiedlichen Teilen des Ziels gelenkt wird, wodurch die Stelle bewegt wird, auf welcher die Röntgenstrahlen durch die Röntgenstrahl-Quelle erzeugt werden. Die Vorrichtung umfaßt ferner einen Röntgenstrahl-Detektor, welcher derart angeordnet ist, daß er durch die Röntgenstrahl-Quelle erzeugte Röntgenstrahlen empfängt, sowie eine Einrichtung zum Bewegen der Position des Röntgenstrahl-Detektors. Die Vorrichtung hat ferner ein Rückkopplungssystem zum Synchronisieren der Bewegung der Röntgenstrahl-Quelle mit der Bewegung des Röntgenstrahl-Detektors. Vorzugsweise weist die Vorrichtung ein Testobjekt auf, welches ein Bild auf dem Röntgenstrahl-Detektor bildet, wenn das Testobjekt zwischen der Röntgenstrahl-Quelle und dem Röntgenstrahl-Detektor positioniert wird. Das Rückkopplungssystem treibt die elektrische Steuereinrichtung in Abhängigkeit von der Bewegung des Detektors derart an, daß das Bild des Testobjektes an einer vorgegebenen Position auf dem Röntgenstrahl-Detektor angeordnet ist, wenn der Röntgenstrahl-Detektor und die Röntgenstrahl-Quelle sich relativ zum Testobjekt bewegen.

Bei bevorzugten Ausführungsbeispielen bewirkt das Rückkopplungssystem, daß die Röntgenstrahl-Quelle einen ersten kreisförmigen Weg um eine erste Rotationsachse durchquert, welcher eine erste Ebene bildet, und die Einrichtung zum Bewegen des Röntgenstrahl-Detektors bewirkt, daß der Röntgenstrahl-Detektor einen zweiten kreisförmigen Weg um eine zweite Rotationsachse durchquert, welcher eine zweite Ebene bildet. Vorzugsweise ist die erste Ebene zur zweiten Ebene im wesentlichen parallel. Weiter bevorzugt ist die erste Achse im wesentlichen koextensiv zur zweiten Achse, so daß der erste kreisförmige Weg und der zweite kreisförmige Weg im wesentlichen die gleiche Rotationsachse aufweisen.

Vorzugsweise umfaßt der Schritt zum Herstellen eines Querschnittsbildes der elektrischen Verbindung bei dem Verfahren zum Prüfen einer elektrischen Verbindung zwischen elektri-

schen Bauteilen, welche auf einer Leiterplatte befestigt sind, ferner die Schritte zum Erzeugen von Röntgenstrahlen mit einer Röntgenstrahl-Quelle, und Erfassen der Röntgenstrahlen mit einem Röntgenstrahl-Detektor und den Schritt zum Erzeugen eines Röntgenstrahl-Laminographen der elektrischen Verbindung. Der Schritt zum Herstellen des Röntgenstrahl-Laminographen umfaßt ferner die Schritte des Bewegens der Röntgenstrahl-Quelle und des Röntgenstrahl-Detektors mit Bezug auf die elektrische Verbindung. Der Schritt zum Erzeugen des Röntgenstrahl-Laminographen umfaßt ferner die Schritte des Bewegens der Röntgenstrahl-Quelle durch elektrische Elemente, Bewegen des Röntgenstrahl-Detektors durch elektromechanische Elemente und Synchronisieren der Röntgenstrahl-Quellen- und der Röntgenstrahl-Detektor-Bewegungen mit einem elektrischen Rückkopplungssystem.

Bei einem bevorzugten Verfahren umfaßt der Schritt des Analysieren des Querschnittsbildes ferner den Schritt des Suchens nach speziellen Merkmalen im Querschnittbild, und den Schritt zum Ausführen vorgegebener Tests bzw. Prüfungen an dem Querschnittsbild an vorbestimmten Stellen des Bildes, um die speziellen Merkmale zu identifizieren.

Der Schritt des Analysierens des Querschnittsbildes kann vorteilhafterweise die Schritte des Berechnens einer Reihe von Differenzialbild-Intensitätsgrauwerten entlang einer Grenze umfassen, welche die elektrischen Verbindungen umgibt, sowie das Vergleichen der Differenzialgrauwerte mit einem vorgegebenen Schwellengrauwert. Das Verfahren kann vorzugsweise die Schritte des Identifizierens von Stellen entlang der Grenze umfassen, wobei die berechneten Differenzialbild-Intensitätsgrauwerte den Schwellenwert übersteigen und die Stellen der Lötmittelüberbrückungsdefekte bezeichnen.

Alternativ kann der Schritt des Analysierens des Querschnittsbildes ferner die Schritte des Festlegens dreier

Bereiche des Querschnittsbildes entsprechend dreier unterschiedlicher Bereiche der elektrischen Verbindung, Berechnen einer Durchschnittsbildintensität für jeden der drei Bereiche und Vergleichen der Durchschnittsbildintensität mit einem ersten und einem zweiten Satz von vorgegebenen Schwellenwerten umfassen. Der Schritt des Analysierens des Querschnittsbildes kann vorteilhafterweise zudem die Schritte des Identifizierens von Stellen, an welchen die Durchschnittsintensitäten kleiner als sowohl der erste und der zweite Satz von Schwellenwerten sind, und des Bestimmens der Stellen, als Defekte mit fehlendem Lötmedium, umfassen. Alternativ kann der Schritt des Analysierens der Querschnittsbilder ferner die Schritte des Identifizierens der Stellen umfassen, an welchen die Durchschnittsintensitäten geringer als der erste Satz von Schwellenwerten und größer als der zweite Satz von Schwellenwerten ist und Bezeichnen der Stellen als Defekte mit nicht ausreichendem Lötmedium, aufweisen.

Ein Verfahren zum Erzeugen von Röntgenstrahl-Laminographen eines Gegenstandes bzw. Objektes umfaßt vorzugsweise die Schritte des Vorsehens einer Röntgenstrahl-Quelle, wobei die Röntgenstrahlen durch einen Elektronenstrahl erzeugt werden, welcher auf ein Ziel bzw. Target auftrifft, und Richten des Elektronenstrahls auf unterschiedliche Bereiche des Targets, wodurch eine Stelle bewegt wird, an welcher die Röntgenstrahlen durch die Röntgenstrahl-Quelle erzeugt werden. Das Verfahren kann ferner die Schritte des Erfassens der durch die Röntgenstrahl-Quelle erzeugten Röntgenstrahlen mit einem Röntgenstrahl-Detektor, Bewegen der Position des Röntgenstrahl-Detektors und Synchronisieren der Bewegung der Position der Röntgenstrahl-Produktion mit der Bewegung des Röntgenstrahl-Detektors durch ein Rückkopplungssystem umfassen.

Vorzugsweise umfaßt das Verfahren ferner den Schritt zum Positionieren eines Testobjektes bzw. Prüfgegenstandes

zwischen der Röntgenstrahl-Quelle und dem Röntgenstrahl-Detektor derart, daß das Testobjekt ein Bild auf dem Röntgenstrahl-Detektor ausbildet. Das Verfahren umfaßt ferner den Schritt des Antreibens des Rückkopplungssystems entsprechend der Bewegung des Detektors, so daß das Bild des Testobjektes an einer vorgegebenen Position auf dem Röntgenstrahl-Detektor positioniert ist, wenn der Röntgenstrahl-Detektor und die Stelle der Röntgenstrahl-Produktion sich relativ zum Testobjekt bewegen.

Ein Verfahren zum Erfassen von Lötmittelüberbrückungsdefekten an Lötverbindungen zwischen elektrischen Bauteilen auf Leiterplatten umfaßt vorzugsweise Schritte des Erzeugens eines Querschnittsbildes der Lötverbindung, Berechnen einer Reihe von Differenzialbild-Intensitätsgrauwerten entlang einer Grenze, welche das Querschnittsbild der Lötverbindung umgibt, Vergleichen der Differenzialgrauwerte mit einem vorgegebenen Schwellengrauwert und identifizieren der Stellen entlang der Grenze, an welchen die berechneten Differenzialbild-Intensitätsgrauwerte den Schwellenwert übersteigen.

Ein Verfahren zum Erfassen von Lötmitteldefekten an einer Lötverbindung zwischen elektrischen Bauteilen auf Leiterplatten umfaßt vorzugsweise die Schritte des Erzeugens eines Querschnittsbildes der Lötverbindung, Festlegen eines Bereiches des Querschnittsbildes entsprechend der Lötverbindung, Berechnen einer Durchschnittsbildintensität für den Bereich und Vergleichen der Durchschnittsbildintensität mit einem ersten und einem zweiten Satz von vorbestimmten Schwellenwerten. Vorzugsweise umfaßt dieses Verfahren ferner die Schritte des Festlegens eines ersten Fensters, eines zweiten Fensters und eines dritten Fensters innerhalb des Bereiches des Querschnittsbildes. Das erste Fenster entspricht einem ersten Bereich der Lötverbindung, das zweite Fenster entspricht einem zweiten Bereich der Lötverbindung und das dritte Fenster entspricht einem dritten Bereich der

Lötverbindung. Das Verfahren umfaßt vorzugsweise die Schritte des Berechnens einer ersten Durchschnittsbildintensität entsprechend dem ersten Fenster, einer zweiten Durchschnittsbildintensität entsprechend dem zweiten Fenster und einer dritten Durchschnittsbildintensität entsprechen dem dritten Fenster. Dieses Verfahren weist vorzugsweise die Schritte des Festlegens eines ersten vorgegebenen Schwellenwertes entsprechend dem ersten Bereich der Lötverbindung, eines zweiten vorgegebenen Schwellenwert entsprechend dem zweiten Bereich der Lötverbindung, und eines dritten vorgegebenen Schwellenwert entsprechend dem dritten Bereich der Lötverbindung auf. Das Verfahren umfaßt den Schritt des Vergleichens der ersten Durchschnittsbildintensität mit dem ersten vorgegebenen Schwellenwert, der zweiten Durchschnittsbildintensität mit dem zweiten vorgegebenen Schwellenwert und der dritten Durchschnittsbildintensität mit dem dritten vorgegebenen Schwellenwert. Der Schritt des Vergleichens umfaßt des weiteren den Schritt des Berechnens einer ersten Durchschnittsdicke entsprechend der ersten Durchschnittsbildintensität, einer zweiten Durchschnittsdicke entsprechend der zweiten Durchschnittsbildintensität und einer dritten Durchschnittsdicke entsprechend der dritten Durchschnittsbildintensität. Das Verfahren weist vorzugsweise den Schritt des Identifizierens von Stellen auf, an welchen die erste Durchschnittsdicke kleiner als der erste Schwellenwert und die zweite Durchschnittsdicke kleiner als der zweite Schwellenwert und die dritte Durchschnittsdicke kleiner als der dritte Schwellenwert ist, als fehlenden Lötmitteledefekt auf.

Dieses Verfahren umfaßt ferner vorteilhafterweise die Schritte des Festlegens eines vierten vorgegebenen Schwellenwerts entsprechend dem ersten Bereich der Lötverbindung, eines fünften vorgegebenen Schwellenwerts entsprechend dem zweiten Bereich der Lötverbindung und eines sechsten vorgegebenen Schwellenwerts entsprechend dem dritten Bereich der Lötverbindung; und Vergleichen der ersten Durchschnitts-



bildintensität mit den ersten und vierten vorgegebenen Schwellenwerten, der zweiten Durchschnittsbildintensität mit den zweiten und fünften vorgegebenen Schwellenwert und der dritten Durchschnittsbildintensität mit den dritten und sechsten vorgegebenen Schwellenwerten.

Alternativ kann das Verfahren die Schritte des Festlegens eines vierten vorgegebenen Schwellenwertes entsprechend dem ersten Bereich der Lötverbindung, eines fünften vorgegebenen Schwellenwertes entsprechend dem zweiten Bereich der Lötverbindung und eines sechsten vorgegebenen Schwellenwertes entsprechend dem dritten Bereich der Lötverbindung umfassen; und Identifizieren von Stellen, an welchen die ersten Durchschnittsdicke geringer als der vierte Schwellenwert und größer als der erste Schwellenwert, die zweite Durchschnittsdicke kleiner als der fünfte Schwellenwert und größer als der zweite Schwellenwert und die dritte Durchschnittsdicke kleiner als der sechste Schwellenwert und größer als der dritte Schwellenwert ist, als ein Defekt mit nicht ausreichendem Lötmedium.

Diese und andere bevorzugte Merkmale der vorliegenden Erfindung werden mit Bezug auf die beigefügte Zeichnung ersichtlich.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnung

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Laminographiesystems, welches die Grundlagen des Verfahrens darstellt.

Fig. 2a zeigt einen Gegenstand mit einem Pfeil, einem Kreis und einem Kreuz, welche in dem Gegenstand an drei unterschiedlichen ebenen Positionen ausgebildet sind.

Fig. 2b zeigt einen Laminographen des Gegenstandes von Fig. 2a, fokussiert auf die den Pfeil aufweisende Ebene.

Fig. 2c zeigt einen Laminographen des Gegenstandes von Fig. 2a fokussiert auf die den Kreis aufweisende Ebene.

Fig. 2d zeigt einen Laminographen des Gegenstandes von Fig. 2a fokussiert auf die das Kreuz aufweisende Ebene.

Fig. 2e zeigt ein herkömmliches zweidimensionales Röntgenstrahl-Projektionsbild des Gegenstandes von Fig. 2a.

Fig. 3a zeigt eine schematische Querschnittsansicht eines ersten bevorzugten Ausführungsbeispieles der Bildgestaltungsvorrichtung der Erfindung, welches darstellt, wie das laminographische Bild ausgebildet und durch eine Kamera erfaßt wird.

Fig. 3b zeigt eine Draufsicht eines in Fig. 3a dargestellten vergrößerten Prüfbereiches.

Fig. 3c zeigt eine perspektivische in Fig. 3a dargestellte Ansicht eines Ausführungsbeispieles der Erfindung.

Fig. 4 zeigt Details einer Röntgenstrahl-Röhre mit einer rotierenden Röntgenstrahl-Brennpunkt-Quelle zur Verwendung in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel.

Fig. 5 zeigt eine Querschnittsansicht der Ziel- bzw. Auffanganode der in Fig. 4 dargestellten Röntgenstrahl-Röhre.

Fig. 6 zeigt eine Querschnittsansicht des rotierenden Röntgenstrahl-Detektors und des Kamerasystems.

Fig. 7 zeigt ein schematisches Diagramm, welches das Kalibrierungsverfahren zum Synchronisieren der Röntgen-

strahl-Quellen- und Detektor-Positionen zeigt.

Fig. 8 zeigt ein schematisches Blockdiagramm für das Rückkopplungssteuersystem, welches zur Synchronisation der Röntgenstrahl-Quellen- und Detektor-Bewegungen verwendet wird.

Fig. 9a zeigt eine Prüffestlegung zur Verwendung für ein in Fig. 7 dargestellten Kalibrierungsverfahren.

Fig. 9b zeigt ein Röntgenstrahl-Bild der Prüffestlegung von Fig. 9a.

Fig. 10a zeigt ein Flußdiagramm eines Verfahrens, welches zum Kalibrieren der Synchronisation der Röntgenstrahl-Quellen- und Detektor-Positionen verwendet wird.

Fig. 10b zeigt eine Fortführung des Flußdiagramms von Fig. 10a.

Fig. 11 zeigt ein Blockdiagramm des Computersteuer-und Analysystems.

Fig. 12 zeigt ein schematisches Flußdiagramm des Betriebes des Hauptsteuercomputers, welches die automatisierte Betriebsabfolge darstellt.

Fig. 13 zeigt ein Diagramm des Zeitsteuerzyklusses für die koordinierte Bewegung der Leiterplatte und der Gewinnung der Vielzahl an Feldern von Erfassungsbildern.

Fig. 14 zeigt ein Beispiel eines Prüfberichtes, welcher durch die Erfindung erzeugt wurde.

Fig. 15 zeigt einen typischen Schaltkreis, auf welchem eine

Vielzahl von elektrischen Vorrichtungen angeordnet sind, die durch mehrere Lötverbindungen verbunden sind.

Fig. 16 zeigt eine typische drahtlose Chipträgervorrichtung, welche sich in einer Stellung zur Befestigung auf einer Leiterplatte befindet.

Fig. 17 zeigt Beispiele von guten und fehlerhaften Lötverbindungen, welche zwischen einer elektronischen Vorrichtung und einer Leiterplatte ausgebildet sind.

Fig. 18 zeigt ein Querschnittsbild der Lötverbindungen von Fig. 17.

Fig. 19 zeigt ein das Verfahren zum automatischen Positionieren und Identifizieren eines Lötmittelüberbrückungsdefektes.

Fig. 20a zeigt ein Flußdiagramm, welches den Vorgang zum automatischen Positionieren und Identifizieren eines Lötmittelüberbrückungsdefektes darstellt.

Fig. 20b zeigt eine Fortsetzung des Flußdiagrammes von Fig. 20a.

Fig. 21 zeigt das Verfahren zum automatischen Positionieren und Identifizieren einer Lötverbindung mit nicht ausreichendem Lötmittel.

Fig. 22 zeigt eine Querschnittsansicht einer typischen geeigneten Lötverbindung, welche drei Bereiche der Verbindung darstellt.

Fig. 23a zeigt eine grafische Darstellung der Bildintensität gegenüber der Lötmitteldicke für ein Querschnittsbild des Lötmaterials.

Fig. 23b zeigt einen Kalibrierungs-Stufenkeil, welcher zum Kalibrieren der Bildintensität in Bezug auf die Dickenbeziehung verwendet wird.

Fig. 23c zeigt eine grafische Darstellung der Bildintensität in Bezug auf die Dickenbeziehung für den in Fig. 23b dargestellten Kalibrierungs-Stufenkeil.

Fig. 24 zeigt ein Flußdiagramm, welches den Vorgang zum automatischen Positionieren und Identifizieren einer Lötverbindung mit fehlendem oder nicht ausreichenden Lötmittel darstellt.

#### Detaillierte Beschreibung des bevorzugten Ausführungsbeispiels

Im folgenden wird der Begriff "Strahlung" für elektromagnetische Strahlung verwendet, welche Röntgen-, gamma- und ultraviolette Anteile des elektromagnetischen Strahlungsspektrums aufweist, jedoch nicht auf diese beschränkt ist.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung der in der vorliegenden Erfindung verwendeten laminographischen Geometrie. Ein Gegenstand bzw. ein Objekt 10, etwa eine Leiterplatte, wird bei der Überprüfung in einer stationären Position bezüglich einer Röntgenstrahlungs-Quelle 20 und einem Röntgenstrahlungs-Detektor 30 gehalten. Eine synchrone Drehung der Röntgenstrahlungs-Quelle 20 und des Detektors 30 um eine gemeinsame Achse 40 bewirkt ein Röntgenstrahlbild der Ebene 60 innerhalb des Gegenstandes 10, welches auf dem Detektor 30 ausgebildet wird. Die Bildebene 60 ist im wesentlichen parallel zu den Ebenen 62 und 64, welche durch die Drehung der Quelle 20 bzw. des Detektors 30 festgelegt werden. Die Bildebene 60 ist am Schnittpunkt 70 des zentralen Strahls 50 von der Röntgenstrahlungs-Quelle 20 und der gemeinsamen



Drehachse 40 angeordnet. Dieser Schnittpunkt 70 wirkt als Drehpunkt für den zentralen Strahl 50, so daß ein "In-Fokus"-Querschnitts-Röntgenbild des Gegenstandes 10 in der Ebene 60 auf dem Detektor 30 verursacht wird, wenn die Quelle und der Detektor sich synchron um den Schnittpunkt 70 drehen. Eine innerhalb des Objektes 10 befindliche Struktur bzw. Gefüge, welches außerhalb der Ebene 60 liegt, bildet ein verschwommenes Röntgenbild auf dem Detektor 30.

Die in Fig. 1 dargestellte laminographische Geometrie stellt die bevorzugte Geometrie der vorliegenden Erfindung dar. Jedoch müssen die Drehachse der Strahlungsquelle 20 und die Drehachse des Detektors 30 nicht axial sein. Solange die Drehebene 62 und 64 zueinander parallel und die Drehachsen der Quelle und des Detektors parallel und in deren Beziehung zueinander fest sind, sind die Laminographiezustände befriedigend und es wird ein Querschnittsbild der Schicht 60 erzeugt. Dies verringert die Anzahl der Zwangsbedingungen auf die mechanische Ausrichtung der Vorrichtung der vorliegenden Erfindung.

Die Fig. 2a bis 2e zeigen Laminographen, welche durch das oben beschriebene laminographische Verfahren erzeugt wurden. Das in Fig. 2a dargestellte Objekt 10 weist Testmuster in Form eines Pfeils 81, eines Kreises 82 und eines Kreuzes 83 auf, welche innerhalb des Gegenstandes bzw. des Objektes 10 in drei unterschiedlichen Ebenen 60a, 60b bzw. 60c angeordnet sind.

Fig. 2b zeigt einen typischen Laminographen des Gegenstandes 10, welcher auf dem Detektor 30 ausgebildet wird, wenn der Schnittpunkt 70 innerhalb der Ebene 60a von Fig. 2a liegt. Das Bild 100 des Pfeils 81 ist scharf eingestellt bzw. fokussiert, während die Bilder der anderen Merkmale innerhalb des Gegenstandes 10, wie etwa der Kreis 82 und das Kreuz 83 einen verschwommenen Bereich 102 bilden, welcher das Pfeilbild 100 nicht wesentlich verklärt.

Analog ist das Bild 110 des Kreises 82, wie in Fig. 2c dargestellt, scharf eingestellt, wenn der Schnittpunkt 70 in der Ebene 60b liegt. Der Pfeil 81 und das Kreuz 83 bilden sodann einen verschwommenen Bereich 112.

Die Fig. 2d zeigt ein scharfes Bild 120, welches aus dem Kreuz 83 gebildet wird, wenn der Schnittpunkt 70 in der Ebene 60c liegt. Der Pfeil 81 und der Kreis 82 bilden dann den verschwommenen Bereich 122.

Die Fig. 2e zeigt im Vergleich ein Röntgenstrahl-Schattenbild des Gegenstandes 10, welches bei herkömmlichen projektions-radiographischen Verfahren ausgebildet wurde. Dieses Verfahren erzeugt scharfe Bilder 130, 132 und 134 des Pfeils 81, des Kreises 82 bzw. des Kreuzes 83, welche einander überlappen. Die Fig. 2e zeigt deutlich, wie viele innerhalb des Gegenstandes 10 beinhaltete Charakteristika viele überschattende Merkmale im Röntgenbild erzeugen können, welche einzelne Merkmale des Bildes verklären bzw. verwischen.

Die Fig. 3a zeigt ein schematisches Diagramm eines bevorzugten Ausführungsbeispieles der Erfindung. Bei diesem bevorzugten Ausführungsbeispiel stellt der zu prüfende Gegenstand eine Leiterplatte 210 mit mehreren bzw. multiplen elektrischen Bauteil 212 dar, welche auf die Platte 210 montiert und elektrisch durch elektrische Verbindungen 214 (sh. Fig. 3b) verbunden sind. Normalerweise werden die elektrischen Verbindungen 214 aus Lötmedium bzw. durch verlöten gebildet. Jedoch sind verschiedene andere Verfahren zum Ausbilden elektrischer Verbindungen 214 bekannt und obwohl die Erfindung mit Bezug auf Lötverbindungen beschrieben wird, ist es verständlich, daß andere elektrische Verbindungen 214 unter Einsatz der Erfindung untersuchbar bzw. prüfbar sind, wobei die Verbindungen leitfähige epoxy-, mechanische-, wolfram- und eutektische Verbindungen aufweisen können, jedoch nicht auf diese beschränkt sind. Die eine vergrößerte Draufsicht auf einen Bereich 283 der

Leiterplatte 210 darstellende Fig. 3b zeigt deutlicher die Bauteile 212 und Lötverbindungen 214.

Diese Erfindung erzeugt bzw. gewinnt Querschnittsbilder der Lötverbindungen 214 unter Verwendung des vorher beschriebenen laminographischen Verfahrens oder anderer Verfahren, welche äquivalente Querschnittsbilder erzeugen können. Die Querschnittsbilder der Lötverbindungen 214 werden automatisch bewertet, um ihre Qualität zu bestimmen. Auf der Bewertung basierend wird ein Bericht der Lötverbindungsqualität dem Benutzer präsentiert.

Die in Fig. 3 dargestellte Erfindung umfaßt eine Röntgenstrahl-Röhre 200, welche der Leiterplatte 210 benachbart positioniert ist. Die Leiterplatte 210 wird durch eine Befestigung 220 gestützt. Die Befestigung 220 ist an einem Positioniertisch 230 befestigt, welcher die Befestigung 220 und die Platte 210 entlang dreier zueinander senkrechter Achsen X, Y und Z bewegen kann. Ein rotierender Röntgenstrahl-Detektor 240 weist einen fluoreszierenden Schirm 250, einen ersten Spiegel 252, einen zweiten Spiegel 254 und einen Drehtisch 256 auf, und ist benachbart der Leiterplatte 210 auf der zur Röntgenstrahl-Röhre 200 gegenüberliegenden Seite positioniert. Eine Kamera 258 ist dem Spiegel 252 gegenüberliegend angeordnet, um in die Spiegel 252, 254 vom fluoreszierenden Schirm 250 reflektierte Bilder zu betrachten. Ein Rückkopplungssystem 260 hat eine Eingangsverbindung 262 mit dem Sensor 263, welcher die Winkelposition des Drehtisches 256 erfaßt, und eine Ausgangsverbindung 264 zu den X- Y- Ablenkwindungen bzw. Spulen 281 auf der Röntgenstrahl-Röhre 200. Ein Positionscodierer 265 ist am Drehtisch 256 befestigt. Der Positionssensor 263 ist benachbart dem Codierer 265 in einer festen Position relativ zur Drehachse 40 montiert. Die Kamera 258 ist mit einem Hauptcomputer 270 durch eine Eingangsleitung 276 verbunden. Der Hauptcomputer 270 ist mit einem Hochgeschwindigkeits-Bild-Analysecomputer 273 verbunden. Daten werden zwischen dem Hauptcomputer 270

und dem Bild-Analysecomputer 273 durch einen Datenfluß 274 übertragen. Eine Ausgangsleitung 278 vom Hauptcomputer 270 verbindet den Hauptcomputer mit dem Positioniertisch 230.

Eine perspektivische Ansicht der Erfindung ist in Fig. 3c dargestellt. Zusätzlich zu in Fig. 3a dargestellter Röntgenstrahl-Röhre 200, Leiterplatte 210, fluoreszierendem Schirm 250, Drehtisch 256, Kamera 258, Positioniertisch 230 und Computern 270, 272 sind ein Granit-Stütztisch 290, eine Belade/Entladeöffnung 292 und eine Bedienerstation 294 dargestellt. Der Granittisch 290 schafft eine starre, vibrationsfreie Plattform für die strukturelle Integrierung der Hauptfunktionselemente der Erfindung, welche die Röntgenstrahl-Röhre 200, den Positioniertisch 230 und den Drehtisch 256 aufweisen, jedoch nicht auf diese begrenzt sind. Die Belade/Entladeöffnung 292 schafft eine Einrichtung zum Einfügen und Entfernen von Leiterplatten 210 aus der Vorrichtung. Die Bedienerstation 294 liefert eine Eingabe/ Ausgabemöglichkeit zum Steuern der Funktionen der Erfindung als auch zum Weiterleiten der Prüfdaten an eine Bedienungs-person.

Bei in den Fig. 3a und 3c dargestelltem Betrieb der Erfindungs werden hochauflösenden, Querschnitts-Röntgenbilder der die Bauteile 212 auf der Leiterplatte 210 verbindenden Lötverbindungen 214 unter Verwendung des vorher mit Bezug auf die Fig. 1 und 2 beschriebenen laminographischen Verfahrens gewonnen. Insbesondere umfaßt die in Fig. 3a dargestellte Röntgen-Röhre 200 einen rotierenden Elektronenstrahl 285, welcher eine drehende Quelle 280 von Röntgenstrahlen erzeugt. Der Röntgenstrahl 282 beleuchtet einen Bereich 283 der Leiterplatte 210 mit Lötverbindungen 214, welche innerhalb des Bereiches 283 angeordnet sind. Die Röntgenstrahlen 284, welche die Lötverbindungen 214, die Bauteile 212 und die Platte 210 durchdringen, werden durch den rotierenden fluoreszierenden Schirm 250 aufgefangen.

Eine dynamische Fluchtung bzw. Ausrichtung der Position der Röntgenstrahl-Quelle 280 mit der Position des rotierenden Röntgenstrahl-Detektors 240 wird präzise durch das Rückkopplungssystem 260 gesteuert. Das Rückkopplungssystem koreliert die Position des rotierenden Drehtisches 256 mit kalibrierten X- und Y-Ablenkwerten, welche in einer Festlegungstabelle (LUT) gespeichert sind. Antriebssignale, welche proportional zu den kalibrierten X-, Y-Ablenkwerten sind, werden an die Steuerspule 281 bzw. -windungen auf der Röntgenstrahl-Röhre 200 übertragen. In Abhängigkeit von diesen Antriebssignalen lenken die Steuerspulen 281 den Elektronenstrahl 285 zu Stellen auf einer ringförmigen Aufnahme- bzw. Zielanode 287 derart ab, daß die Position des Röntgenstrahl-Quellenpunktes 280 synchron mit der Rotation des Detektors 240 in der vorher in Verbindung mit Fig. 1 beschriebenen Weise rotiert.

Die Röntgenstrahlen 284, welche die Platte 210 durchdringen und auf dem fluoreszierenden Schirm 240 auftreffen werden in sichtbares Licht 286 umgewandelt, wodurch ein sichtbares Bild einer einzigen Ebene innerhalb des Bereichs 283 der Leiterplatte 210 erzeugt wird. Das sichtbare Licht 286 wird durch die Spiegel 252 und 254 in die Kamera 258 reflektiert. Die Kamera 258 umfaßt normalerweise eine industrielle Fernsehkamera (CCTV) mit schwacher Lichtintensität, welche elektronische Videosignale, die dem Röntgenstrahl und den sichtbaren Bildern entsprechen, zu dem Hauptcomputer 270 durch die Leitung 276 überträgt. Das elektronische Videoformatbild wird zu einem Hochgeschwindigkeits-Analysecomputer 272 durch die Leitung 274 übertragen. Der Bildanalysecomputer 272 analysiert und interpretiert das Bild, um die Qualität der Lötverbindung 214 zu bestimmen.

Der Hauptcomputer 270 steuert zudem die Bewegung des Positioniertisches 230 und somit der Leiterplatte 210, so daß unterschiedliche Bereiche der Leiterplatte 210 automatisch innerhalb des Prüfbereiches 283 positionierbar sind.



### Rotierende Röntgenstrahl-Quelle

Fig. 4 zeigt eine Röntgen(strahl)-Röhre 200, welche den rotierenden Röntgenstrahl 282 liefert, um hochauflösende Laminographen der Leiterplatte zu erzeugen. Die Röhre 200 umfaßt einen Kathodenstrahlerzeuger 310, welcher benachbart eines Hochspannungselektrodenbereiches 220 montiert ist. Die Fokussierungsspule 330 bzw. -windung und die Steuerspulen 281 bzw. -windungen sind zwischen dem Elektrodenbereich 220 und der ringförmigen Ziel-Auffanganode 287 positioniert. Ein Elektronenstrahlauffang 360 und ein Röntgenstrahl-Fenster 370 sind innerhalb der zentralen Fläche befestigt, welche durch die ringförmige Anode 287 festgelegt ist. Eine Vakuumhülle 380 umschließt die evakuierten Bereiche der Röntgenstrahl-Röhrenanordnung 200.

Bei Betrieb emittiert der Kathodenstrahlerzeuger 310 einen Elektronenstrahl 258 in den Hochspannungselektrodenbereich 320. Eine Gleichspannung wird an den Elektronenstrahlerzeuger 310 und die Zielanode 278 angelegt, um den Elektronenstrahl 285 zur Kollision mit der Anode 287 zu beschleunigen und zu führen. Teile des Hochspannungssignals werden an die Elektroden 322 angelegt, welche den Elektronenstrahl 285 führen, beschleunigen und formen. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel beträgt das Hochspannungssignal ungefähr 160 kV und kann ungefähr einen Strom von 7,5 Mikroampere durch den Elektronenstrahl 285 zur Anode 287 liefern. Vorzugsweise wird das Hochspannungssignal innerhalb einer Genauigkeit von 0,01 % konstant gehalten. Diese Werte sind beispielhaft und andere Spannungen, Ströme und Genauigkeiten können verwendet bzw. eingesetzt werden.

Nachdem der Elektronenstrahl 285 den Elektrodenbereich 320 durchlaufen hat, tritt er in einen Bereich der Röhre ein, in welchem die Form und die Richtung des Elektronenstrahls durch die Fokussierungsspule 330 und Steuerspulen 281

beeinflusst werden. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel erzeugen die Spulen 330 und 281 elektromagnetische Felder, welche mit dem Elektronenstrahl 285 zusammenwirken, so daß der Elektronenstrahl 285 auf besondere Stellen auf der Anode 287 fokussiert als auch gerichtet wird. Die Röntgenstrahl-Quelle 280 fällt mit diesen besonderen Stellen zusammen, von welchen der Röntgenstrahl 282 emittiert wird. Auf diese Weise wird ein extrem schmaler ungefähr einen 20 Mikron Durchmesser aufweisender Elektronenstrahl-(Brenn-)punkt auf der Anode 287 an diesen Stellen ausgebildet. Die Größe dieses Punktes spielt eine eminent wichtige Rolle bei der Bestimmung der kompletten Auflösung der Röntgenstrahl-Bilder, welche von der Quelle der Röntgenstrahlen 280 erzielt wird, wie im Radiographiebereich bekannt ist.

Die Steuerspulen 281 zusammen mit der ringförmigen Anode 287 ermöglichen es, daß die Röntgenstrahl-Röhre 200 Röntgenstrahlen von der Quelle 280 liefert, wobei sich die Position der Quelle 280 in einem kreisförmigen Muster um die Anode bewegt. Das kreisförmige Muster wird um einen Drehpunkt 402 zentriert, welcher innerhalb einer Querschnitt-Bildebene 403 des Gegenstandes 410 angeordnet ist.

Detaillierter dargestellt können die Steuerspulen 281 den Elektronenstrahl 285 zu jedem gewünschten Bereich einer Innenfläche 354 der Anode 287 lenken. Der Elektronenstrahl 285 kann zur Anode 287 gelenkt werden, indem die elektromagnetischen Spulen 281 mit geeignet synchronisierten X- und Y-Antriebssignalen angetrieben werden, so daß der Strahl einen kreisförmigen Pfad entlang der Innenfläche 354 der Anode 287 umschreibt.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel weisen die Steuerspulen 281 getrennte X- und Y-elektromagnetische Spulen auf, welche den Elektronenstrahl 285 in den X- bzw. Y-Richtungen lenken. Elektrischer in den Spulen 288 fließender Strom erzeugt Magnetfelder, welche mit dem Elektronenstrahl 285

zusammenwirken, so daß der Strahl abgelenkt wird. Diese Spulen 281 weisen einen ähnlichen Aufbau und eine ähnliche Funktion wie die bei Kathodenstrahl-Röhren (CRT) aufgefundenen Lochspulen auf. Andererseits können auch elektrostatische Ablenkverfahren verwendet werden, um den Elektronenstrahl 285 abzulenken.

Die Oberfläche 354, durch welche der Elektronenstrahl 285 auf die Anode 287 auftrifft ist derart geformt, daß ein zentraler Röntgenstrahl 392 des Röntgenstrahls 282 von der Quellenposition 280 abgeht und zum Drehpunkt 402 gelenkt wird. Somit wird der zentrale Strahl 392 immer zu der gleichen Position bzw. Stelle 402 gelenkt, wenn der Elektronenstrahl 285 einen kreisförmigen Pfad entlang der Oberfläche 354 umschreibt.

Das Material der Oberfläche 354 der Anode 287 wird derart ausgewählt, daß die Strahlung, welche erzeugt wird, wenn der Elektronenstrahl 285 auf die Oberfläche 344 auftrifft, die erwünschten Energiecharakteristika bzw. -eigenschaften aufweist. Die durch Beschuß eines Zielmaterials mit einem beschleunigten Elektronenstrahl erzeugte Strahlung ist als Bremsstrahlung bekannt. Die Charakteristika der Bremsstrahlung werden hauptsächlich durch die Energie des Elektronenstrahls und der Materialzusammensetzung des Ziels, auf welches der Elektronenstrahl gerichtet ist, bestimmt. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die durch den Elektronenstrahl 285 beschossene Oberfläche 354 mit einer Wolframmetallschicht bedeckt.

Das Substrat 356, auf welches die Wolframoberfläche 354 plaziert wird, kann Kupfer oder jedes andere geeignete Metall sein. Ein Material mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit, wie etwa Kupfer, ist besonders für die Anwendung geeignet, da eine starke Aufheizung der Zielanode 287 auftritt, wenn die Energie des Elektronenstrahls 285 in die Anode eingelagert wird. Das Kupfersubstrat 356 schafft einen

sehr wirkungsvollen Wärmeleiter zum Ableiten der Wärme von den Positionen 280, an welchen der Elektronenstrahl 285 mit der Anode 287 kollidiert.

Der bei der Kollision des Elektronenstrahls 285 mit der Wolframschicht 354 erzeugte Strahlungs-Strahl 282 verläßt die Röhre 200 durch ein Fenster 370. Das Fenster 370 bildet einen Teil der Vakuumschale der Röhre 200, in welcher sich der Elektronenstrahl 285 ausbreitet, wobei das Fenster 370 dem innerhalb der Röhre an der Oberfläche 354 erzeugten Röntgenstrahlen ermöglicht den Vakuumbereich der Röhre mit minimalem Intensitäts- und Energieverlust zu verlassen. Titan wird allgemein zur Bildung von Röntgenstrahl-Fenstern für Röntgenstrahl-Röhren eingesetzt und ist in diesem Fensterausführungsbeispiel 370 bevorzugt. Jedoch können andere Materialien zur Ausbildung des Fensters 370 auch verwendet werden.

Während der Röntgenstrahl-Prüfung einer Leiterplatte oder eines anderen Gegenstandes 410 ist es oftmals von Vorteil die Röntgenstrahlen auszuschalten, während die Leiterplatte bewegt wird, so daß verschiedene Bereiche der Platte sich innerhalb der Prüffläche 400 befinden. Wünschenswerterweise werden die Röntgenstrahlen so schnell als möglich ein- und ausgeschaltet. Zusätzlich wird vorzugsweise der EIN/AUS-Zyklus durchgeführt, so daß die während aller EIN-Bereiche der Zyklen erzeugten Röntgenstrahlen im wesentlichen eine identische Energie, Intensität und optische Eigenschaften bzw. Charakteristika aufweisen. Die Röntgen-Röhre 200 erreicht diese schnelle EIN/AUS-stabilisierte Zyklisierung der Röntgenstrahlung, indem der Elektronenstrahl 285 in den Strahlauffang 360 gelenkt wird. Diese Ablenkung des Elektronenstrahls 285 verhindert einen Austritt der Röntgenstrahlen aus dem Fenster 370. Somit wird die zum Objekt 410 gerichtete Strahlungsproduktion gestoppt, d.h. ausgeschaltet, während das Objekt bzw. der Gegenstand wieder positioniert wird. Die Lenkspulen 281 schaffen eine schnelle

Einrichtung zum Erreichen dieser Ablenkung des Elektronenstrahls 285 in den Strahlenauffang 360. Dieses Ausschaltverfahren der Röntgenstrahlen ermöglicht, daß der Elektronenstrahl 285 und alle anderen Wirkungen der Röntgenstrahlröhre, welche die Eigenschaften des Röntgenstrahls 282 beeinflussen, während der EIN/AUS-Zyklisierung nicht gestört werden. Somit bleiben die Eigenschaften bzw. Charakteristika des Röntgenstrahls 282 von den vorherigen EIN-Zyklen im wesentlichen unverändert, wenn der Elektronenstrahl 285 wieder auf die Anode 287 im EIN-Bereich der Zyklen gerichtet wird.

Der Strahlauffang 360 besteht aus einem Material, welches eine hochgradig dämpfende Wirkung auf Röntgenstrahlen hat, etwa Blei oder Kupfer. Die Dicke, die Position und die Form des Strahlenauffanges 360 sind derart ausgewählt, daß ein Entweichen der Röntgenstrahlen aus der Röhre 200 durch die Fenster 310 verhindert wird, wenn der Strahl in den Strahl-auffang gelenkt wird. Diese Parameter werden von einem Fachmann auf dem Gebiet der Röntgenröhrenausgestaltung sehr einfach bestimmt.

Eine vergrößerte Querschnittansicht der Anode 287 ist in Fig. 5 dargestellt. In diesem bevorzugten Ausführungsbeispiel umfaßt die ringförmige Zieloberfläche 354 einen Konusbereich, welcher um eine Achse 404 symmetrisch ist. Die Zielanode 287 ist auf der Röhre 200 derart befestigt, so daß die Achse 404 des Konus mit der zentralen Z-Achse der Röhre 200 zusammenfällt. Wenn der Elektronenstrahl 285 in einer kreisförmigen Oszillation mit dem Radius  $r_1$  wie bei 406 dargestellt, gelenkt bzw. gesteuert wird, stellt sich die Wirkung somit wie bei einer bewegenden Strahlungspunktquelle 280 dar, welche den herkömmlichen stationären Strahlungsquellen äquivalente Energie-Intensitäts- und Fokussierungscharakteristika aufweist. Andere Formen der Anode 287, welche die gleichen Ergebnisse erzeugen, können auch verwendet werden.



Die Röntgenstrahl-Quelle 200 liefert somit eine Röntgenstrahl-Quelle welche für hochauflösende Röntgenstrahl-Bilder geeignet ist, selbst wenn sie bei einer Geometrie eingesetzt wird, welche die Bilder verstärkt. Zusätzlich kann die Quelle 200 diese Röntgenstrahl-Quelle in einem zum Erstellen von Laminographen geeigneten kreisförmigen Muster bewegen. Diese kreisförmige Bewegung wird ohne Beeinträchtigung der Bildauflösung oder Gewinnungsgeschwindigkeit erreicht. Da die Rotation der Strahlungsquelle elektronisch erzielt wird, sind keine Bewegungsteile erforderlich, wodurch Vibrationen und andere unerwünschte Eigenschaften der mechanischen Systeme ausgeschaltet werden. Eine Röntgenstrahl-Quelle mit den oben beschriebenen Eigenschaften ist von Kevex Corporation als Modell Nr. KM160R erhältlich. Weitere elektrisch gesteuert bewegte Röntgenstrahl-Quellen sind im US-Patent Nr. 4,075,489 mit dem Titel "Method and Apparatus Involving the Gereneration of X-Rays"; US-Patent Nr. 4,352,021 mit dem Titel "X-Ray Transmission Scanning System and Method and Electron Beam X-Ray Scan Tube for Use Therewith"; und im US-Patent Nr. 2,319,350 mit dem Titel "X-Ray Tube and Apparatus" beschrieben.

#### Rotierender Röntgenstrahl-Detektors

In Fig. 6 ist ein Ausführungsbeispiel des rotierenden Röntgenstrahl-Detektorsystems 240 dargestellt, welches vorab in Verbindung mit Fig. 3a beschrieben wurde und in Verbindung mit der rotierenden Röntgenstrahl-Quelle 280 verwendet wird, um Querschnittsbilder eines Gegenstandes 630 zu gewinnen. Wie in Fig. 6 dargestellt wird ein Röntgenstrahl-Bild des Gegenstandes 630 auf dem rotierenden fluoreszierenden Bildschirm 250 durch den Röntgenstrahl 284 ausgebildet. Der Schirm 250 wandelt diese Röntgenstrahlen in optische Signale 286 um, so daß diese durch herkömmliche optische Vorrichtungen erfaßt werden können. Bei dem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die optischen Signale 286 vom rotierenden fluoreszierenden Schirm 250 durch die industrielle

Fernsehkamera (CCTV) 258 erfaßt. Die Kamera 258 wandelt die optischen Signale 286 in elektrische Signale für die weitere Verarbeitung durch Computersysteme 270 und 272 um. Das optische Bild, welches auf dem Schirm 250 ausgebildet ist, dreht sich mit dem Schirm. Um den Bedarf an mechanischer Bewegung der CCTV-Kamera 258 zu eliminieren, welche das rotierende optische Bild betrachtet bzw. aufnimmt wird das optische Bild innerhalb des rotierenden Detektors 240 durch optische Spiegel 252 und 254 de-rotiert, so daß die rotierenden optischen Bilder, welche auf dem rotierenden Bildschirm 250 ausgebildet sind, bei der Betrachtung durch die Kamera stationär erscheinen.

Der rotierende Röntgenstrahl-Detektor 240 umfaßt den Drehtisch 256, welcher um die Achse 404 durch ein Lager 700 drehbar befestigt ist. Die Achse 404 ist nominal die gleiche Achse, um welche die Quelle der rotierenden Röntgenstrahlen 280 dreht. Der fluoreszierende Schirm 250 ist am Oberteil des Drehtisches 256 befestigt. Die beiden Spiegel 252 und 254 sind innerhalb des Drehtisches 256 parallel zueinander und mit einem Winkel von  $45^\circ$  bezüglich der Achse 404 montiert. Der Spiegel 252 ist im Zentrum des Drehtisches 256 befestigt, so daß er die Achse 404 nahe dem Zentrum des Spiegels schneidet. Der Spiegel 254 ist innerhalb des Drehtisches 256 so befestigt, daß er sowohl den ersten Spiegel 252 als auch den fluoreszierenden Schirm 250 zugewandt ist. Der fluoreszierende Schirm 250 sowie die Spiegel 252 und 254 sind am Drehtisch 256 derart befestigt, daß der Drehtisch, die Spiegel und der Schirm sich um die Achse 404 als eine einzige Einheit drehen. Diese Anordnung aus Spiegeln, Drehtisch und Schirm bildet eine optische De-Rotationsanordnung für optische Bilder, welche auf dem Schirm 250 ausgebildet sind, wenn der Detektor 240 um die Achse 404 gedreht wird.

Ein Röntgenstrahl-Schattenbild des Objektes 630 wird auf dem fluoreszierenden Schirm 250 abgebildet, wenn der Röntgenstrahl 284 auf dem Schirm auftrifft. Der fluoreszierende

Schirm 250 wirkt als Röntgenstrahl-/optischer Wandler. Beispielsweise wird sichtbares Licht 286 von der der Röntgenstrahl-Quelle 280 gegenüberliegenden Schirmoberfläche 652 emittiert, wenn Röntgenstrahlen 284 auf die Oberfläche 651 des Schirms 250 auftreffen, welcher der Röntgenstrahl-Quelle 280 zugewandt ist. Die von der fluoreszierenden Schirmoberfläche 652 emittierten optischen Signale 286 werden durch die beiden parallelen Spiegel 252 und 254 in eine Linse 699 reflektiert, welche an der industriellen Fernsehkamera 258 befestigt ist.

Der fluoreszierende Schirm 250 wird mechanisch mit einer gleichförmigen Winkelgeschwindigkeit um die Achse 404 in der Ebene 64 gedreht, welche im wesentlichen parallel zur Ebene 62 ist, die durch die kreisförmige Bewegung der bewegenden Strahlungspunktquelle 280 festgelegt ist. Die Spiegel 252, 254 reflektieren das optische Bild von dem rotierenden fluoreszierenden Schirm in das stationäre Kamerasystem 258 durch die Linse 699, so daß die Rotation des Bildes in der Ebene 64 für die Kamera 258 nicht erscheint. Diese Spiegelanordnung wurde früher im US-Patent Nr. 2,998,51 mit dem Titel "Tomoscope" beschrieben.

Als Folge der starren Befestigung des fluoreszierenden Schirms 250 am rotierenden Drehtisch 256 haben aufeinanderfolgende Bilder des Gegenstandes 630, welche auf dem Schirm ausgebildet werden, unterschiedliche Orientierungen oder Ausrichtungen mit Bezug auf dem Schirm, wenn er seinen kreisförmigen Pfad um die Achse 404 durchquert. Somit ist es wünschenswert, daß das Fluoreszieren eines Punktes auf der Schirmoberfläche abrupt unterdrückt wird, nachdem dieser Punkt nicht länger durch einen Röntgenstrahl getroffen wird, um ein Verschwimmen des Bildes zu vermeiden, welches durch die Bewegung des Bildes mit Bezug auf den Schirm erzeugt wird. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel umfaßt der fluoreszierende Schirm 250 praseodymgedoptes Gadoliniumoxysulfid,  $Gd_2O_2SiPr$ . Praseodymgedoptes Gadoliniumoxysulfid ist

ein Scintillationsmaterial, welches ausreichend schnell ist, so daß ein Verschwimmen aufgrund von Bildbewegung bezüglich des Schirmes vermieden wird und zudem liefert es einen ausreichenden Lichtausgang für die Erfassung durch das Kamerasystem 258.

Alternativ können auch "langsamere" Schirme verwendet werden. Um jedoch ein Bewegungsverschwimmen zu verhindern muß der Schirm 250 drehbar auf dem Drehtisch 256 derart montiert sein, daß ein Bild des Objektes 630, welches auf dem Schirm ausgebildet ist, mit Bezug auf dem Schirm stationär bleibt. Eine derartige Bewegung kann beispielsweise durch einen Satz von Zahnrädern erreicht werden, welche eine kreisförmige Bewegung des Schirms mit Bezug auf den Drehtisch synchronisiert mit der Drehung des Drehtisches um die Achse 404 überlagert.

Ein (nicht dargestelltes) alternatives Ausführungsbeispiel für die Rotation des Röntgenstrahl-Detektors 240, welches eine optische De-Rotationsanordnung ausbildet, ersetzt die beiden flachen Spiegel 252, 254 durch ein geeignet gekrümmtes Bündel an Bildleitern, etwa optische Fasern, welche mit dem fluoreszierenden Schirm 250 gekoppelt und sich gleichförmig mit dem Schirm drehen. Die Bildleiter übertragen die Bilder von dem fluoreszierenden Schirm 250 zu einer Position, welche auf der Rotationsachse 404 zentriert ist, um die gleiche Wirkung wie die beiden in Fig. 3a und 6 dargestellten parallelen Spiegel zu erzielen. Diese Bildleiter können optische Fasern, Elektronenleiter oder äquivalente Einrichtungen umfassen.

#### Querschnittsbild-Ausbildung

Wie vorher erläutert, wird ein Querschnittsbild des Gegenstandes 630 auf dem Schirm 250 ausgebildet, wenn der Schirm 250 und die Röntgenstrahl-Quelle 280 synchron um die

Achse 404 rotieren. Die Verschwimmwirkungen des Laminographieverfahrens und die Bildauflösung werden maximiert, wenn das Querschnittsbild während einer kompletten Rotation des Schirmes 250 und der Quelle 280 um die Achse 404 gewonnen wird. Das Kamerasystem 258 erfaßt die Entwicklung des Querschnittsbildes auf dem fluoreszierenden Schirm 250 durch die optische De-Rotationsanordnung mit den Spiegeln 252 und 254.

Da der fluoreszierende Schirm 250 keine optischen Signale mit hoher Intensität emittieren kann, ist es oftmals von Vorteil die optischen Signale 286 mit einer hochempfindlichen Schwachlichtniveau-Vorrichtung zu erfassen. Die Verwendung einer Schwachlichtniveau-Erfassungseinrichtung verbessert somit die erfaßte Bildqualität, indem ein größerer Bereich der optischen Signale 286 erfaßt wird, welche von dem fluoreszierenden Schirm 250 während einer einzigen Rotation des Schirmes emittiert wurden. Viele Schwachlichtniveau-Kamerasysteme weisen einen Bildverstärker als Teil des Kamerasystems auf, so daß die Schwachlichtniveau-Empfindlichkeit verbessert wird. Ein spezielles System ist als siliziumverstärkte Zielkamera (SIT) bekannt und kann extrem schwache Lichtniveaus erfassen. SIT-Kamerasysteme sind bekannt und komplett verfügbar. Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung setzt ein SIT-Kamerasystem ein, welches auf dem RCA-Modell 4804BHP2-12 SIT-Röhre basiert.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein Querschnittsbild in ungefähr 0,1 Sekunden während der Rotation des fluoreszierenden Schirms 250 um die Achse 404 bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 600 Umdrehungen/Min. gewonnen. Während einer kompletten Umdrehung werden drei Videoeinzelnbilder, von denen jedes eine Zeitdauer von 1/30 Sekunden aufweist, durch die Kamera 258 gesammelt. Die drei Videoeinzelnbilder werden von der Kamera 258 zum Hauptcomputer 270 (in Fig. 3a dargestellt) weitergeleitet, in welchem die drei Einzelbilder miteinander gemittelt werden, so daß eine digitale Darstellung des Querschnittsbildes des Gegenstandes 630



ausgebildet wird, welcher auf dem fluoreszierenden Schirm 250 während einer einzigen Rotation des Schirmes 250 um die Achse 404 gebildet wird. Alternativ kann die Kamera 258 mit einer CRT verbunden sein, so daß das Querschnittsbild direkt erfaßt werden kann.

#### Quelle/Detektor-Synchronisierung

Die Ausbildung eines hochauflösenden laminographischen Querschnittsbildes hängt von der präzisen Fluchtung bzw. Ausrichtung und Synchronisierung der kreisförmigen Bewegungen der Strahlungsquelle 280 und des Detektorschirms 250 ab. Wie in Fig. 7 dargestellt, wird eine geeignete Ausrichtung und Synchronisierung erzielt, wenn der zentrale Röntgenstrahl 392 von der Quelle 280 durch einen starren Punkt 87 läuft, welcher auf der Achse 404 liegt, so daß der zentrale Röntgenstrahl 392 immer direkt auf einen einzigen Punkt 880 auf der Oberfläche des Detektorschirms 250 gerichtet ist. Bei der in Fig. 7 dargestellten Anordnung wird dies eindeutig erreicht, wenn die Winkelpositionen der Quelle und des Detektorschirms relativ zu einer starren Referenzposition um  $180^\circ$  getrennt sind.

Die bevorzugte Ausrichtung und Synchronisierung der Quelle 280 und des Detektorschirms 250 werden durch das in Fig. 3a dargestellte Rückkopplungssystem 260 beibehalten. Die Position des rotierenden Drehtisches 256, auf welchem der Röntgenstrahl-Detektorschirm 250 montiert ist, wird durch den Sensor 263 überwacht. Die Drehtischposition wird an das Rückkopplungssystem 260 weitergeleitet, welches Antriebssignale entsprechend der Position des Drehtisches den Elektronenstrahl-Ablenkspulen 281 zuführt. Die Antriebssignale steuern die Position der Röntgenstrahl-Quelle 280 derart, daß die Quelle 280 und der Schirm 250 immer fluchten, wenn sich der Drehtisch um die Achse 404 dreht. Das Rückkopplungssystem hält auf diese Weise die genaue Geometrie bei,

welche für die Erzeugung von hochauflösenden Querschnittsbildern erforderlich ist. Dieses System kompensiert Fluchtungsungenauigkeiten der Röntgenröhre 200 und des rotierenden Röntgenstrahl-Detektors 240; Verarbeitungs-, Befestigungs- und Herstellungsungenauigkeiten und Defekte der Zielanode 287 und deren Oberflächenbeschichtung 354; Abbildungsfehler, wie etwa Astigmatismus, des Elektrodenstrahlweges 385 durch die Röntgenröhre; und Veränderungen der Drehgeschwindigkeit des rotierenden Drehtisches während der Bildausbildung.

Ein detailliertes Blockdiagramm des Rückkopplungssystems 260 ist in Fig. 8 dargestellt. Das Rückkopplungssystem 260 umfaßt X- und Y-Festlegungstabellen ((LUTs) 720X bzw. 720Y, X- und Y-Digital/Analogwandler (DACs) 723X bzw. 723Y, und X- und Y-Spulentreiber 724X bzw. 724Y. Die LUTs 720X und 720Y sind vorzugsweise Festkörper digitale RAM Speicher. Das Rückkopplungssystem verbindet den rotierenden Röntgenstrahl-Detektor 240 mit den Röntgenstrahlröhren-Ablenkungsspulen 281 bei Steuerung durch das Hauptcomputersystem 270.

Während sich der rotierende Röntgenstrahl-Detektor 240 um die Achse 404 dreht erfaßt der Positionssensor 263 die Winkelposition des Detektors 240 von dem Positionskodierer 265. Die erfaßte Winkelposition wird in X- und Y-Adressensignale umgewandelt, welche der Winkelposition des Detektors entsprechen. Die Adressensignale werden zu den X- und Y-LUTs 720 X, 720Y durch eine Kommunikationsleitung 721 weitergeleitet. Durch eine Quellen/Detektor-Ausrichtungskalibrierungs-Prozedur werden X- und Y-Kalibrierungsdaten bestimmt und in den X- und Y- LUTs für jede Winkelposition des Detektors abgespeichert. Somit besteht eine eins-zu-eins Übereinstimmung zwischen den X- und Y-Adressen von dem Kodierer und den X- und Y-Kalibrierungsdaten in den LUT's. Die X- und Y-Kalibrierungsdaten werden von den LUTs in Form von elektrischen digitalen Signalen wieder aufgefunden. Die elektronischen digitalen Signale werden von den X- und

Y-LUTs zu den X- und Y-DACs 723 X bzw. 723 Y durch Kommunikationsleitungen 722 X und 722 Y übertragen. Die DACs wandeln die digitalen Signale in analoge elektrische Signale um, welche durch Leitungen 725 X und 725 Y zu den Spulentreibern 724 X und 724 Y wandern. Die Spulentreiber verstärken ihre jeweiligen analogen Eingangssignale und legen resultierende Ausgangssignale über Leitungen 726 X und 726 Y an die Spulen 281 X bzw. 281 Y an, um eine genaue Ablenkung des Elektronenstrahls 285 zu erzielen, welcher für eine geeignete Ablenkung der Quelle und des Detektors erforderlich ist. Der Elektronenstrahl wird durch das Zusammenwirken von magnetischen Feldern abgelenkt, welche durch das Anlegen der Ausgangssignale an die Spulen 281 erzeugt werden. Wenn der Elektronenstrahl die Magnetfelder durchquert wird er abgelenkt, wodurch die Position des Röntgenstrahl-Quellenpunktes 280 auf der Anode 287 bewegt wird. Der Bewegungsabstand des Punktes ist zur Größe der Treibersignale proportional, wie durch die Kalibrierungsdaten bestimmt wird.

Die LUT-Kalibrierungsdaten werden in der schematisch in Fig. 7 dargestellten Kalibrierungsanordnung bestimmt. Ein Prüf- bzw. Testmuster 730 wird zwischen der Röntgenstrahl-Quelle und dem Detektorschirm 250 derart positioniert, daß das Testmuster 730 die Achse 404 an der Stelle 780 schneidet. Ein herkömmliches Röntgenstrahl-Schattenzeigerbild 830 (shadowgraph image) des Testmusters 730 wird auf dem Schirm 250 ausgebildet. Die optische Darstellung des Röntgenstrahl-Bildes 830 auf dem Schirm wird durch die Kamera 258 (sh. Fig. 3a) aufgenommen. Eine elektrische Darstellung des optischen Bildes wird von der Kamera 258 mittels elektrischer Signale von der Leitung 276 zum Hauptcomputer 270 und zum Bildanalysecomputer 272 ausgegeben. Die elektrischen Signale der Leitung 276 werden durch dem Computer 270 digitalisiert und im Speicher des Computers 270 im Digitalformat gespeichert.

Ein in Fig. 9a dargestelltes bevorzugtes Ausführungsbeispiel des Testmusters 730 weist ein Fundament 732 aus einem Material, wie etwa Kunststoff, auf, welches gegenüber Röntgenstrahlen relativ transparent ist. Das Fundament 732 ist ungefähr  $12,7 \times 12,7$  mm ( $0,5 \times 0,5$  inch) lang und breit und ungefähr 2,54 mm (0,1 inch) dick. An einer zentralen Stelle 780 auf dem Fundament 732 sind drei Elemente mit 0,0254 mm (0,001 inch) durchmessrigen Wolframdraht 781a, 781b 781c montiert, welche derart ausgerichtet sind, daß der Draht 781c die zentrale Stelle 780 schneidet. Die Drähte 781a und 781b sind auf dem Fundament 732 befestigt, so daß sie sich auf gegenüberliegenden Seiten des Drahtes 781c befinden, und daß eine die Drähte 781a und 781b verbindende Leitung auch die zentrale Stelle 780 schneidet. Somit bilden die Drähte 781a, 781b und 781c ein Vergleichs-Fadenkreuz 781 mit dessen Zentrum an der Position 780. Um das Fadenkreuz 781 herum sind acht Markierungen 782 aus Blei oder einem anderen Röntgenstrahl undurchlässigen Material befestigt. Die Bleimarkierungen 782a bis 782d sind ungefähr Quadratisch mit 1,587 mm (0,0625 inch) (Seitenlänge) und haben eine Dicke von ungefähr 0,1016 mm (0,004 inch) und sind nahe den vier Ecken des Fundaments 732 angeordnet. Die Bleimarkierungen 782e bis 782h spannen ein Quadrat mit ungefähr 1,5875 mm (0,0625 inch) und weisen eine Dicke von ungefähr 0,2032 mm (0,008 inch) auf und sind zwischen den Markierungen 782a bis 782d angeordnet.

Eine Darstellung eines typischen Röntgenstrahl-Schattenzeigerbildes 830 des Testmusters 730 ist in Fig. 9b dargestellt. Die Bleimarkierungen 782a bis 782h bilden jeweils Bildbereiche 882a bis 882a des Bildes 830. Der Mittelpunkt 780 des Testmusters 730 wird durch den Bildmittelpunkt 880 dargestellt. Analog bilden die Wolframdrähte 781a bis 781c jeweils Bildbereiche 881a bis 881c.

Ein durch gestrichelte Linien 884a bis 884d dargestellter Bereich des Bildes 830 formt einen rechteckigen interessie-

renden Bereich (ROI) 884, welcher die Bilder der Bleimarkierungen 882 und der Wolframdrähte 881 umgibt. Der interessierende Bereich 884 wird im Computer 270 im Digitalformat gespeichert. Bekannterweise weisen die digital gespeicherten Bilder eine Pixelanordnung bzw. Pixel-Array auf, wobei jedes Pixel einen kleinen Bereich des Bildes darstellt. Insbesondere wird der interessierende Bereich 884 in ein Pixelraster mit 512 Spalten entlang dem Rand 884a und 480 Reihen entlang dem Rand 480b unterteilt. Jedes Pixel im Raster kann durch dessen entsprechende Spalten- und Reihen-Bezeichnung dargestellt werden. Beispielsweise wird die untere linke Ecke 885 des interessierenden Bereiches 884 durch das Pixel (0,0) bezeichnet. Analog wird die Ecke 886 durch das Pixel (511,0) dargestellt, die Ecke 887 durch das Pixel (511,479) und die Ecke 888 durch das Pixel (0,479) bezeichnet. Die zentrale Position 880 wird durch das Pixel (256, 240) bezeichnet. Bei einem Ausführungsbeispiel entspricht der Abstand der Ecken 885 und 886 des Bildes 830 ungefähr 0,400 inches auf dem Testmuster 730. Analog korrespondiert der Abstand zwischen den Ecken 885 und 88 des Bildes ungefähr mit 0,375 inches auf dem Testmuster.

Die Bestimmung der Kalibrierungsdaten für die X- und Y-LUTs wird entweder manuell oder automatisch unter Einsatz des Testmusters 730 durchgeführt. Wiederum bezugnehmend auf die Fig. 3a und 7 wird eine anfängliche Ausrichtung der Röntgenstrahl-Quelle 280, des Testmusters 730, des Drehtisches 256 und der Kamera 258 manuell ausgeführt. Zuerst wird das Testmuster 730 positioniert, so daß der Mittelpunkt 780 die Achse 404 schneidet. Die Röntgenröhre 200, der Drehtisch 256 und die Kamera 258 werden anschließend mechanisch ausgerichtet, so daß das Testfestlegungsbild, 830, welches auf dem Schirm 250 ausgebildet wird, sich kontinuierlich innerhalb des Blickfeldes der Kamera während einer kompletten Umdrehung der Quelle 280 und des Drehtisches 256 um die Achse 404 befindet. Nachdem das System auf diese Weise mechanisch ausgerichtet wurde, wird der Drehtisch 256 in einer anfäng-



lichen Winkelposition positioniert, welche als  $\theta = 0^\circ$  festgelegt ist. Bei dieser Anfangsposition entspricht das Mittelpunktspixel (256, 240) des digitalen Bildes, welches durch die Kamera erfaßt und im Computer abgespeichert wurde, einer Position 880a auf dem Schirm 250. Die Quelle 280 ist an einer Position 280a positioniert, welche mit einer Winkelposition von ungefähr  $\theta = 180^\circ$  angeordnet ist, wodurch das Testmusterbild 830 innerhalb des Blickfeldes der Kamera plaziert wird. Wenn der Bildmittelpunkt 880 des Testmusterbildes 830 sich nicht innerhalb des Mittelpunktspixels (256, 240) befindet werden anschließend die X- und Y-Ablenkungswerte eingestellt, um die Position 280a der Quelle 280 zu ändern, welche wiederum die Position des Bildmittelpunktes 880 auf dem Schirm 250 ändert. Die Ablenkungswerte werden solange eingestellt, bis der Bildmittelpunkt 880 präzise an der Mittelpunkts-Pixelposition (256, 240) positioniert ist. Diese Ablenkungswerte werden anschließend in den LUTs 720 als Kalibrierungsdaten für die Drehtisch-256-Position  $\theta = 0^\circ$  gespeichert. Der Drehtisch 256 und der Schirm 250 werden anschließend zu einer neuen Winkelposition entsprechend einem Winkel  $\theta = \Delta \theta$ . Die Quelle 280 wird zu einer Position 280b entsprechend einer Winkelposition von ungefähr  $\theta = \Delta \theta + 180^\circ$  bewegt, so daß das Testmusterbild 830 innerhalb des Sichtfeldes der Kamera positioniert wird. Wenn der Bildmittelpunkt 880 des Testmusterbildes 830 sich nicht innerhalb des Mittelpunktspixels (258, 240) befindet, werden anschließend die X- und Y-Ablenkwerte justiert, um die Position 280b der Quelle 280 einzustellen, so daß der Bildmittelpunkt 880 wieder präzise in der Mittelpunktspixelposition (256, 240) positioniert wird. Diese Ablenkungswerte werden anschließend in den LUTs als Kalibrierungsdaten für die Drehtisch-256-Position  $\theta = \Delta \theta^\circ$  gespeichert. Dieses Verfahren zum Bestimmen der LUT-Kalibrierungsdaten wird in Schritten von  $\Delta \theta^\circ$  fortgesetzt, bis die Quelle 280 und der Drehtisch 256 eine Umdrehung um die Achse 404 komplett durchgeführt haben.

Die für die Positionen 280a, 280b, 280c, ..., 280n der

Quelle bestimmten LUT-Kalibrierungsdaten werden zum Bestimmen der Formel verwendet, welche einen Kreis mit Radius  $r$  als Funktion einer Winkelposition  $\theta$  darstellt. Der Radius  $r$  ist der nominale Radius des Weges, welchem die rotierende Quelle 280 folgt. Diese Formel wird anschließend zur Berechnung der Kalibrierungsdaten für die Quellenpositionen, welche zwischen den Positionen 280a, 280b, 280c, ..., 280n liegen, verwendet.

Fig. 10 zeigt ein grundlegendes Flußdiagramm der logischen Schrittfolge, welche durch das Kalibrierungsverfahren ausgeführt wird, um die X- und Y-Kalibrierungsdaten zu bestimmen, welche in den X- und Y-LUTs 720 zum Steuern der Ablenkungsspulen 281 gespeichert sind. Zuerst werden, wie vorher beschrieben Mechanismen der Erfindung, welche in den Fig. 3a dargestellt sind, mit der Röntgenstrahl-Röhre 200, der Drehtischanordnung 256 und dem X- Y- Z-Positioniertisch 230 mit ungefährrer Ausrichtung zusammengebaut und montiert. Als nächstes wird das Testmuster 730 auf dem XYZ-Positioniertisch befestigt und durch den XYZ-Positioniertisch derart zu einer Position bewegt, daß die Mittelpunktssposition 780 des Testmusters 730 mit dem Punkt 720 zusammenfällt, welcher den Schnittpunkt der zentralen Achse 404 und des nominalen Mittelpunkts-Röntgenstrahls 292 von der Röntgenstrahl-Quelle 280 (sh. Fig. 7) darstellt.

Der mechanische Ausrichtschritt der Röntgenröhre 200 und optischer Anordnungen wird durch einen Aktivitätsblock bzw. eine Betriebseinheit 904 in Figur 10 dargestellt. Die Steuerung geht von der Betriebseinheit 904 über einen Pfad 906 bzw. Weg zu einer Betriebseinheit 908, wobei die Testfestlegung 730 auf dem Positioniertisch befestigt und ausgerichtet wird. Die Steuerung wird anschließend durch einen Pfad 910 zu einer Betriebseinheit 912 weitergeleitet, wobei die Röntgenstrahl-Quelle eingeschaltet und der Elektronenstrahl zu einer Strahl-Unterbrechungsposition (beam dump location) gelenkt wird. Dies stabilisiert die Röntgen-

strahl-Röhre, ohne daß das Testmuster und der Detektor dem Röntgenstrahlen ausgesetzt wird. Die Steuerung läuft durch den Pfad 914 zu einer Betriebseinheit 916, wobei die Winkelpositionsvariable  $\theta$  und eine Adressen-Indexvariable  $i$  bei  $\theta = 0^\circ$  bzw.  $i = 1$  initialisiert werden. Die Steuerung fährt von der Betriebseinheit 916 zur Betriebseinheit 920 durch einen Pfad 918 fort. Die Betriebseinheit 920 stellt die Initialisierung der LUTs mit anfänglichen Näherungen dar:

$$L_{xi} = A_r \sin \theta \quad (1)$$

$$L_{yi} = A_r \cos \theta \quad (2)$$

wobei  $A_r$  proportional zum ungefähren Radius der rotierenden Quelle 280  $i$  die LUT Adresse ist, welche die Ablenkungsdaten entsprechend der Winkelposition  $\theta$  enthält. Bei der Betriebseinheit 924, welche durch den Weg 922 vom Block 920 erreicht wird, wird die Winkelposition  $\theta$  um einen Betrag  $\Delta\theta$  und der Index  $i$  um 1 erhöht. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel beträgt die Winkelerhöhung  $\Delta\theta$  ungefähr  $0,022^\circ$ , was ungefähr 16384 Winkelpositionen pro Umdrehung entspricht. Bei diesem Ausführungsbeispiel haben die X- und Y-LUTs jeweils mindestens 16384 Adressenpositionen für die Speicherung der Ablenkdaten, welche jeder einzelnen Winkelposition entsprechen, und der Adressenindex  $i$  nimmt integrale Werte im Bereich von 1 bis mindestens 16384 an. Die Steuerung läuft anschließend weiter über den Weg bzw. Pfad 926 zum Entscheidungsblock 928. Bei dem Entscheidungsblock 928 wird der Wert von  $\theta$  geprüft, um zu sehen, ob er größer als oder gleich  $360^\circ$  ist. Wenn  $\theta$  nicht größer als oder gleich  $360^\circ$  ist, kehrt die Steuerung anschließend zur Einheit 920 durch den Weg 930 zurück. Wenn  $\theta$  größer als oder gleich  $360^\circ$  ist, kehrt die Steuerung anschließend durch den Weg 932 zur Betriebseinheit 934 fort. Die Schritte von 920 bis 928 bilden eine Schleife, wobei alle verfügbaren LUT-Adressen mit anfänglichen Ablenkungswerten geladen werden, durch welche der Elektronenstrahl einem kreisförmigen Weg auf der Anode der Röntgenstrahl-Röhre umschreibt. Bei dem Ausfüh-

rungsbeispiel mit 16384 einzelnen Winkelpositionen werden die Schritte 920 bis 928 ungefähr 16384 mal ausgeführt.

Nach der Vervollständigung des LUT-Initialisierungsvorganges läuft die Steuerung über den Weg 932 zur Betriebseinheit 934, wobei der Detektor bei einer anfänglichen Referenzposition positioniert wird, welche als  $\phi = 0^\circ$  festgelegt ist. Die Steuerung wird anschließend durch den Weg 936 zur Betriebseinheit 938 übertragen, wobei die in den LUTs gespeicherten Stromdaten ( $L_{xi}$ ,  $L_{yi}$ ) zur Steuerung der Drehung der Röntgenstrahl-Quelle eingesetzt werden. Wenn die Betriebseinheit 938 durch den Weg 936 erreicht wird, stellen die Stromdaten in den LUTs die anfänglichen Werte dar, welche entsprechend den Gleichungen (1) und (2) berechnet werden, und bezeichnen eine anfängliche Näherung der durch das nachfolgend beschriebene Kalibrierungsverfahren berechneten abschließenden Werte.

Die Bestimmung der LUT-Kalibrierungsdaten fährt über einen Pfad 940 zur Betriebseinheit 942 fort. In der Einheit 942 wird die rotierende Röntgenstrahl-Quelle 280 bei einer Winkelposition  $\theta$  angehalten, welche ungefähr  $(\phi + 180)^\circ$  entspricht, wobei  $\phi$  die Winkelposition des Röntgenstrahl-Detektors ist. Wenn der Detektor bei der anfänglichen Position  $\phi = 0^\circ$  ist, wird beispielsweise anschließend der Röntgenstrahl-Detektor bei der Winkelposition  $180^\circ$  in der Einheit 942 positioniert. Bei dem Ausführungsbeispiel mit 16384 Winkelpositionen und entsprechenden LUT-Adressen werden die in den LUT-Speicherpositionen  $L_{x8192}$  und  $L_{y8192}$  gespeicherten Ablenkwerte die Ablenkung für den Elektronenstrahl zu der Position auf der Anode entsprechend einer Winkelposition der Röntgenstrahl-Quelle von  $180^\circ$  erzeugen.

Anschließend fährt die Steuerung durch die Leitung 944 zur Betriebseinheit 946 fort, um die rotierende Röntgenstrahl-Quelle bei dem Winkel  $\theta$  in der Betriebseinheit 942 anzuhalten. Bei der Betriebseinheit 942 wird ein Querschnittsbild

830 des Testmusters 730 erhalten und in einem digitalen Bildspeicher abgespeichert. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel umfaßt der Bildspeicher ein Pixelraster mit 512 Spalten und 480 Reihen.

Ein Weg 984 überträgt die Steuerung von der Betriebseinheit 946 zur Betriebseinheit 950, wobei das Pixel (die Pixel) ( $C_C$ ,  $R_C$ ) die Position des Bildmittelpunktes 880 des Bildes 830 beinhaltet (beinhalten).  $C_C$  und  $R_C$  sind jeweils die Spalten und Reihenbestimmungen des Bildpixels, welches den Mittelpunkt des Bildes umfaßt, und können manuell oder automatisch durch Computeranalyseverfahren identifiziert werden.

Die Bildmittelpunkt-Pixelposition ( $C_C$ ,  $R_C$ ), welche im Aktivitätsblock 950 bestimmt wurde, wird zur Betriebseinheit 954 durch den Weg 952 übertragen, wobei der relative Versatz des Bildmittelpunktes vom Detektormittelpunkt entsprechend der folgenden Gleichungen berechnet wird:

$$\Delta C = 256 - C_C \quad (3)$$

$$\Delta R = 240 - R_C \quad (4)$$

wobei  $\Delta C$  und  $\Delta R$  den Abstand darstellen, um welchen der Mittelpunkt des Testmusterbildes ( $C_C$ ,  $R_C$ ) vom Mittelpunkt des durch das Pixel (256, 240) bestimmten digitalen Bildes versetzt ist.

Die in der Betriebseinheit 954 berechneten  $\Delta C$  und  $\Delta R$ -Werte werden durch den Weg 956 zum Entscheidungsblock 958 übertragen, wobei  $\Delta C$  und  $\Delta R$  mit dem Wert Null verglichen werden. Wenn  $\Delta C$  und  $\Delta R$  im wesentlichen nicht Null sind, d.h., wenn deren absolute Werte kleiner als eine gewisse willkürliche kleine Zahl,  $\epsilon$  ist, dann stimmt der Testmuster-Bildmittelpunkt nicht mit dem digitalen Bildmittelpunkt überein und die Steuerung läuft über den Weg 960 weiter zur Betriebseinheit 962, bei welcher die LUT-Kalibrierungsdaten entsprechend eingestellt werden.



Bei der Betriebseinheit 962 werden die LUT-Kalibrierungsdaten  $L_{xi}$  und  $L_{yi}$  entsprechend den folgenden Gleichungen eingestellt:

$$L_{xi}' = L_{xi} + f(\Delta C, \Delta R) \quad (5)$$

$$L_{yi}' = L_{yi} + g(\Delta C, \Delta R) \quad (6)$$

Die mathematischen Funktionen  $f(C, R)$  und  $g(C, R)$  werden zum Berechnen der Einstellgröße der LUT-Werte  $L_{xi}$  bzw.  $L_{yi}$  verwendet, welche die Zentrierfehler  $\Delta C$  und  $\Delta R$  verringern. Die Werte  $L_{xi}$  und  $L_{yi}$  in den LUTs werden durch die eingestellten Werte  $L_{xi}'$  bzw.  $L_{yi}'$  ersetzt. Diesen eingestellten LUT-Werte werden zu der Betriebseinheit 938 durch die Leitung 964 übertragen und eine erste Schleife mit dem Schritten 938, 942, 946, 950, 954, 958 und 962 wird wieder durchgeführt, bis der Bildmittelpunkt im wesentlichen mit dem digitalen Bildmittelpunkt zusammenfällt. Wenn das Bild zentriert ist, betragen  $\Delta C$  und  $\Delta R$  im wesentlichen Null und die Steuerung fährt vom Entscheidungsblock 958 über den Weg bzw. Pfad 960 zur Betriebseinheit 968 fort.

In der Einheit 968 wird die Detektor-Position um den Betrag  $\phi$  zu der nächsten Winkelposition ( $\phi + \Delta\phi$ ) erhöht. Die neue Winkelposition des Detektors wird über den Weg 970 zum Entscheidungsblock 972 weitergeleitet, um festzustellen, ob der neue Winkel  $\phi$  größer oder gleich  $360^\circ$  ist. Wenn  $\phi$  kleiner als  $360^\circ$  ist, fährt die Steuerung über den Weg 974 zur Betriebseinheit 938 fort. Eine zweite Schleife mit der ersten Schleife und zusätzlichen Schritten 968 und 972 wird wiederum ausgeführt, bis der Detektor eine Umdrehung beendet hat, d.h. wenn  $\phi$  größer oder gleich  $360^\circ$  ist.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Winkel-erhöhung  $\Delta\phi$  derart ausgewählt, daß sie im wesentlichen größer als die Winkelerhöhung  $\Delta\theta$  zwischen aufeinanderfolgenden Eintritten in die LUTs ist, so daß eine Kalibrierung

für eine komplette Umdrehung in einer kurzen Zeitdauer berechnet werden kann. Wenn beispielsweise die Erhöhung  $\Delta\phi$   $10^\circ$  entspricht, kann eine komplette Umdrehung mit 35 Ausführungen bzw. Wiederholungen der zweiten Schleife berechnet werden. Die verbleibenden LUT-Werte, welche den Positionen zwischen den 36 berechneten Positionen entsprechen, werden durch Interpolation zwischen den benachbarten berechneten Werten bestimmt, wie in der Betriebseinheit 978 dargestellt ist. Die Steuerung fährt anschließend zur Betriebseinheit 982 durch den Weg 980 fort, um beliebig bzw. zufallsverteilt die Zentrierung des Bildes zu prüfen.

Bei der Betriebseinheit 982 werden beliebige Winkelpositionen ausgewählt, bei welchen die Zentrierungsgenauigkeit bestimmt ist. Ein Zentrierungsfehler ERR wird berechnet, welcher den komulativen Fehler aller ausgewählten Positionen widerspiegelt. Der Zentrierungsfehlerwert wird über den Weg 984 zum Entscheidungsblock 986 weitergeleitet, bei welchem der Wert mit Null oder einem bestimmten anderen vorgegebenen Wert verglichen wird. Wenn ERR im wesentlichen nicht Null ist, läuft die Steuerung anschließend über den Weg 988 zur Betriebseinheit 990 fort.

Bei der Betriebseinheit 990 werden zusätzliche LUT-Werte  $L_{xi}$  und  $L_{yi}$ , welche zwischen den ersten 36 Werten angeordnet sind, empirisch bestimmt, indem die zweite Schleife für 36 zusätzliche Werte wiederum aktiviert bzw. ausgeführt wird. Wenn beispielsweise die Werte bei der ersten Durchführung der zweiten Schleife für die Winkel  $\phi_1 = 0, 10, 20, 30, \dots, 340$  und  $350^\circ$  bestimmt wurden, werden anschließend die Zwischenwinkel bei der zweiten Durchführung der zweiten Schleife für die Winkel  $\phi_2 = 5, 15, 25, 35, \dots, 345$  und  $355^\circ$  bestimmt.

Eine dritte Schleife mit den Schritten 978, 982, 986 und 990 wird wiederholt, bis der Fehlerwert im wesentlichen Null beträgt oder bis alle LUT-Positionen empirisch bestimmt wurden. Die Steuerung läuft anschließend über den Weg 984

zum Ende des Kalibrierungsverfahrens.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel beträgt die komplette durch die LUTs dargestellte Anzahl an Positionen ungefähr 16 000. Das in den Einheiten 938 und 942 zwischen aufeinanderfolgenden Kalibrierungspositionen dargestellte Starten und Stoppen der Rotation des Elektronenstrahls dient für mindestens zwei Funktionen. Zum ersten wird eine übermäßige Erwärmung der Zielanode auf der Röntgenröhre bzw. Röntgenstrahl-Röhre verhindert, da der rotierende Elektronenstrahl auf keinen Punkt auf der Anode über eine längere Zeitdauer auftrifft. Zum zweiten werden Hysteresis-Effekte bei den Steuerspulen durch den kontinuierlichen Durchgang durch komplette Hysteresis-Zyklen automatisch kompensiert. Obiges Kalibrierungsverfahren kann entweder manuell mittels Steuerung durch eine Bedienungsperson oder automatisch durch einen Computer gesteuert durchgeführt werden.

Aufgrund des endlichen Zeitbetrages, welcher für die Signale von dem Positions-Codierer auf dem rotierenden Detektor erforderlich ist, um bei dem LUT anzukommen, und welcher für die entsprechenden LUT-Werte erforderlich ist, um die Ablenkspulen auf der Röntgenröhre anzutreiben, kann ein Zeitdifferenzial oder eine Zeitverzögerung zwischen der die Position des rotierenden Detektors erfassenden und zu den LUTs übertragenen Zeit und der die entsprechenden Ablenkdaten von den LUTs zu den Röntgenröhren-Ablenkspulen übertragenen Zeit vorgesehen sein. Bei einer sehr langsamen oder Nullrotation ist diese Verzögerung unwesentlich. Wenn jedoch die Rotationsrate zunimmt, wird auch die Verzögerung größer und größer. Diese Verzögerung kann durch einen Phasenversatz, welcher zwischen dem Positionskodierer und den LUT eingefügt wird, kompensiert werden. Der optimale Phasenversatz wird bestimmt, indem der Versatz während der Bewertung des Fokus des Bildes 830 variiert wird. Bei anderen, als den optimalen Versetzungen wird das Bild verschwimmen. Der optimale Versatz entspricht dem schärfsten Bild, während der

Detektor sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht.

Andere Kalibrierungsverfahren können zum Synchronisieren der Rotation der Röntgenstrahl-Röhre und des Röntgenstrahl-Detektors eingesetzt werden.

### Computersteuer- und -analysesystem

Die Fig. 11 zeigt ein Blockdiagramm des Aufbaus des Computersteuer- und -analysesystems für das automatisierte Laminographie-Prüfsystem der vorliegenden Erfindung. Das Computersystem ist um den Hauptsteuercomputer 270 herum zentriert. Eine Video-Rahmen-Greifeinrichtung 102 (video frame grabber) ist in dem Computer 270 durch eine Einsteck-Tafel aufgenommen bzw. eingefügt. Die Schwachlichtniveau-Kamera 258 ist mit dem Hauptcomputer 270 durch die Leitung 276 verbunden. Eine Anzahl an Sub-Systemen bzw. Untersystemen, welche Röntgenstrahlen 104, eine Bewegungssteuerung 106, den Operator 108, die Sicherung 110 und einen Ausdruck 112 aufweisen, kommunizieren mit dem Hauptcomputer durch die Verbindungsleitungen 105, 107, 109, 111 bzw. 113. Eine Vielzahl an Hochgeschwindigkeits-Bildanalysecomputern 272a, 272b, ..., 272m, welche auch als "Analysemaschinen" bezeichnet werden, kommunizieren mit dem Hauptcomputer durch das Datennetzwerk 274. Diese Verbindungen sind als "Nachrichten" ausgebildet, welche zwischen dem Hauptcomputer und den Analysemaschinen durch das Datennetzwerk 274 verlaufen. Die Analysecomputer 272 sind auch mit der Rahmen-Zugreifeinrichtung 102 durch eine Verbindungsleitung 114 verbunden. Beim bevorzugten Ausführungsbeispiel umfaßt jeder Analysecomputer 272 eine COMPAQ 386 Prozessor-Platine mit einer 80386 CPU, 5 Megabytes eines Haupt-RAM-Speichers und einen Video-Rahmen-zugreiffeinrichtungsspeicher. Der Hauptcomputer 270 umfaßt zudem eine COMPAQ 386 Prozessorplatine mit einer 80386 CPU. Die Analysecomputer 272 sind im Hauptcomputer 270 durch ein Standard-SCSI-Netzwerk verbunden.

Bei Betrieb steuert der Hauptcomputer 270 die Vorgänge des Prüfsystems durch die verschiedenen Untersysteme 104 bis 112. Der Hauptcomputer steuert zudem die Gewinnung und Analyse der laminographischen Bilder, von welchen eine Messung der Gegenstandsqualität bei der Prüfung abgeleitet wird. Der Hauptcomputer steuert automatisch den Betrieb der Erfindung auf zwei Arten. Zum einen wird eine programmierte Bewegungsreihenfolge ausgeführt, um digitale Querschnittsbilder zu erzielen. Zum zweiten prüft und interpretiert ein programmiertes Analyseverfahren die digitalen Querschnittsbilder automatisch. Die Analyse eines Bildes kann gleichzeitig mit der Erlangung eines zweiten Bildes durchgeführt werden. Die durch das Hauptcomputersystem durchgeführten Analysen führen zu einer Ausgangsdatenliste, welche die verschiedenen Defekte und andere Bedingungen bzw. Zustände, welche bei der Prüfung in dem Gegenstand erfaßt wurden, in Kategorien unterteilt.

Insbesondere bei der Prüfung von Lötverbindungen auf in den Fig. 3a und 3b dargestellten Leiterplatten steuert der Computer die Bewegung des XYZ-Positioniertisches 230, an welchem die Leiterplatte 210 befestigt ist. Oftmals ist die innerhalb eines Querschnittbildes umfaßte Fläche, etwa 0,400 inch x 0,375 inch, kleiner als die komplette Fläche der zu prüfenden Leiterplatte oder eines anderen Gegenstandes. Hierbei wird der Gegenstand logischerweise durch mehrere X-Y-Ansichtsfelder dargestellt, welche die komplette prüfbare Fläche der Leiterplatte aufweisen, wenn sie kombiniert werden. Der Hauptcomputer positioniert für die Prüfung jedes X-Y-Ansichtsfeld indem er geeignete Bewegungsbefehle an den XYZ-Positioniertisch ausgibt. Nachdem das erste X-Y-Ansichtsfeld sich für die Prüfung in Position befindet, wird das resultierende Querschnittsbild erzielt und in der Kamera integriert. Das Videosignal des Bildes wird anschließend von der Kamera zu dem Hochgeschwindigkeits-Bildanalysecomputer 272 übertragen. Die Leiterplatte kann zudem zu speziellen Z-Positionen bewegt werden, um verschiedene Ebenen der Löt-



verbindung bei den resultierenden Querschnittsbildern scharf einzustellen.

Die bevorzugte Abtastreihenfolge für eine Leiterplatte besteht darin alle erforderlichen Z-Niveaubilder für eine feste X-Y-Position zu sammeln, anschließend zur nächsten X-Y-Position fortfahren und alle erforderlichen Z-Niveaubilder für diese Position zu sammeln. Dieser Schritt und diese Wiederholungsreihenfolge iteriert bis alle notwendigen Flächen und Niveaus der Platte abgebildet und analysiert wurden.

Die unter der Steuerung des Hauptcomputers durchgeführte vollständig automatisierte Prüfung aller Lötverbindungen auf einer Leiterplatte setzt eine vorprogrammierte Prüfroutine ein, welche auf den Einsatz für die zu prüfende spezielle Leiterplattenform angepaßt ist. Die Platte wird abgetastet und jede Lötverbindung durch die Gewinnung und Analyse von Querschnittsbildern geprüft.

Ein die Schritte dieser automatisierten Prüfroutine darstellendes Flußdiagramm ist in Fig. 12 gezeigt. Beginnend von der Betriebseinheit 1050 wird eine zu prüfende Leiterplatte in die Beladungs/Entladungsöffnung 292 der Erfindung (sh. Fig. 3c) eingefügt. Die Steuerung führt anschließend über den Weg 1052 zur Betriebseinheit 1054 fort, wobei der Hauptcomputer eine Nachricht zum XYZ-Positioniertisch sendet, so daß der Tisch die Leiterplatte zu der ersten X-Y-Ansichtsposition bewegt.

Über den Weg 1056 tritt die Routine in eine erste Schleife mit den Betriebseinheiten 1058, 1062, 1066, 1070 und 1074 ein. Bei der Betriebseinheit 1058 empfängt der Hauptcomputer eine Nachricht, daß die Platte sich an der ersten Sichtungsposition befindet. Der Hauptcomputer steuert anschließend die Röntgenstrahl- und Detektor-Subsysteme derart, daß ein Querschnittsbild der Platte an dieser Position erzielt wird. Nachdem das Querschnittsbild gewonnen wurde, fährt die

Steuerung über den Weg 1060 zur Betriebseinheit 1062 fort, wobei das vorher gewonnene Querschnittsbild zu einem der Analysecomputer gesendet wird. Wird über den Weg 1064 zur Betriebseinheit 1066 fortgefahren, wird eine Nachricht durch den Analysecomputer empfangen, welcher die durch das empfangene Bild dargestellte Ansicht und Schnitt einmalig identifiziert. Das Bild wird anschließend durch den Analysecomputer analysiert, während das Hauptcomputerprogramm über den Weg 1068 zum Entscheidungsblock 1070 fortfährt. Im Block 1070 wird die Identifizierung des zuletzt gewonnenen Schnittes geprüft, um abzusehen, ob dies der letzte an der X-Y-Sichtposition aufgenommene Z-Schnitt ist. Falls mehrere Z-Schnitte erforderlich sind, läuft die Steuerung über den Weg 1072 zur Betriebseinheit 1074 fort. Im Block 1074 bewegt der XYZ-Positioniertisch die Leiterplatte in die Z-Richtung, so daß sie für den nächsten zu gewinnenden Z-Schnitt positioniert wird. Die Steuerung läuft anschließend über den Weg 1076 zur Betriebseinheit 1058 fort. Ein weiteres Querschnittsbild wird in der Einheit 1058 erzielt, welches zu einem Analysecomputer im Block 1062 gesendet und im Block 1066 identifiziert und analysiert wird. Die erste Schleife mit den Schritten 1058, 1062, 1066, 1070 und 1074 wird wiederholt, bis im Entscheidungsblock 1070 festgestellt wird, daß der letzte Z-Schnitt für die momentane X-Y-Sichtposition erzielt wurde.

Wenn der letzte Z-Schnitt gewonnen wurde, fährt die Steuerung über den Weg 1078 zur Betriebseinheit 1080 fort, wobei eine Nachricht anzeigt, daß die Prüfung der speziellen X-Y-Ansicht vervollständigt ist. Wenn beispielsweise eine besondere X-Y-Ansicht drei unterschiedliche Z-Niveauschnitte erfordert, dann wird die erste Schleife dreimal ausgeführt, einmal für jedes Z-Niveau. Bei der Beendigung der dritten Durchführung der ersten Schleife zeigt eine Nachricht an, daß alle Daten für diese X-Y-Ansicht gewonnen und analysiert wurden.

Ein Zeitsteuerdiagramm für die als erste Schleife gekennzeichneten Schritte ist in Fig. 13 dargestellt. Die ausgewählte Zeiteinheit beträgt eine Rahmenzeit oder  $1/30$  Sekunde, welche der Geschwindigkeit entspricht, bei welcher die Bilder durch die Kamera als Videosignale übertragen werden. Zu Beginn des ersten Schleifenzyklus wird die Leiterplatte an der gewünschten Prüfposition angeordnet, die Röntgenstrahlen sind eingeschaltet und die Kamera beginnt das Bild während dreier Rahmenzeiten (0,1 Sek.) zu integrieren. Während dieser 0,1 Sek. führen der Drehtisch 256 und die Röntgenstrahl-Quelle 280 (Fig. 3a) eine komplette Umdrehung aus. Während der nächsten, nachfolgenden Rahmenzeit, beginnend bei der Zeit  $3/30$  Sekunden, wird das Bild von der Kamera 258 "ergriffen" und zu einem der Bildanalysecomputer 272 (Fig. 11) gesendet. Währenddessen gibt der Hauptcomputer 272 (Fig. 11) einen ersten Befehl aus, welcher die Erzeugung von Röntgenstrahlen beendet (dies wird dadurch erzielt, daß der Elektronenstrahl 285 in den Strahlauffang 360 in Fig. 4 gelenkt wird) und er gibt einen zweiten Befehl aus, welcher die Leiterplatte zur nächsten Ansichtsflächen- oder Schnittposition bewegt, so daß ein weiteres Bild gewonnen wird. Diese Bewegung wird normalerweise innerhalb 0,1 Sekunden beendet. Während dieser 0,1 Sekunden wird die Leiterplatte zur nächsten Position bewegt und angehalten. Das System ist vorzugsweise derart ausgestaltet, daß jede durch die Bewegung verursachte mechanische Vibration bzw. Schwingung im wesentlichen vor dem Verstreichen der 0,1 Sekunden Zeitdauer gedämpft wird. Der Computer gibt anschließend einen Befehl aus, welcher eine Wiederaufnahme der Röntgenstrahl-Erzeugung bewirkt und der Zyklus wiederholt. Typische Zykluszeiten für die Gewinnung einzelner Bilder beträgt somit ungefähr 0,2 Sekunden, was einer Geschwindigkeit von 5 Bildern pro Sekunde entspricht.

Obwohl die von dem Computer benötigte Zeit zur vollständigen Analyse des Bildes die 0,2 Sekunden Zykluszeit für die Bildgewinnung überschreiten kann, führt ein Ausführungsbeispiel

der Erfindung eine Realzeit-Bildverarbeitung durch, indem die parallelen verarbeitenden Analysecomputer 272 wie in Fig. 11 dargestellt, eingesetzt werden. Die parallele Verarbeitungsanordnung ermöglicht dem System eine Durchführung verschiedener unterschiedlicher Tätigkeiten gleichzeitig. Das System kann beispielsweise gleichzeitig verschiedene unterschiedliche Bilder analysieren, während es zudem zusätzliche Bilder gewinnt. Somit muß bei dem System nicht die Vervollständigung jeder Bildanalyse abgewartet werden, bevor nachfolgende Bilder gewonnen werden können. Die optimale Anzahl an Analysecomputern kann in Abhängigkeit von der Komplexität der auszuführenden Bildanalysen derart festgelegt werden, daß die Bildverarbeitung per Computer nicht zum Flaschenhals bzw. zur Engstelle bei dem Prüfverfahren wird.

Nach der Vervollständigung einer X-Y-Sichtung in Block 1080 fährt die Steuerung über den Weg 1082 zur Betriebseinheit 1084 fort, wobei die Ergebnisse für diese spezielle X-Y-Sichtprüfung in dem Speicher des Hauptcomputers gespeichert werden. Über den Weg 1086 wird zum Entscheidungsblock 1088 fortgefahren und die X- Y-Sichtidentifikation wird geprüft, um zu bestimmen, ob zusätzliche X-Y-Sichtungen der Leiterplatte erforderlich sind.

Falls zusätzliche X-Y-Ansichten benötigt werden, fährt die Steuerung über den Weg 1090 zur Betriebseinheit 1054 fort. Eine zweite Schleife mit den Schritten 1054, 1058, 1062, 1066, 1070, 1074, 1080, 1084 und 1088 wird viele Male durchgeführt, bis alle programmierten Bildpositionen auf der Leiterplatte gewonnen und analysiert wurden.

Wenn alle programmierten Bildpositionen geprüft wurden, läuft die Steuerung über den Weg 1092 zur Betriebseinheit 1094 weiter, welche anzeigt, daß die Prüfung beendet ist und die Platte wird entladen.

Wird über den Weg 1096 zur Betriebseinheit 1098 fortgefahren

ren, so werden die Prüfergebnisse der vorher geprüften Platte in Form eines Prüfberichtes ausgegeben. Die Steuerung kehrt anschließend über den Weg 1100 zum Beginn der Prüfroutine an der Betriebseinheit 1050 zurück und das System kann beginnen eine weitere Leiterplatte zu prüfen.

Ein Beispiel für einen typischen Prüfbericht ist in Fig. 14 dargestellt. Verschiedene Buchführungsvermerke zeichnen das Datum und die Zeit 1102 der Prüfung, Modell-Nr. der Leiterplatte 1104 und die Seriennummer der geprüften speziellen Platte 1106 auf. Die Ergebnisse der Prüfung werden in drei Spalten tabellarisch zusammengestellt, welche den Vorrichtungsnamen 1108, die Pinnanzahl bzw. Stiftzahl, wo Defekte gefunden wurden 1110, und den erfaßten Lötstellendefekttyp 1112 kennzeichnen. Bei diesem speziellen Beispiel ist ersichtlich, daß eine mit U13 bezeichnete Vorrichtung einen Lötmittelüberbrückungsdefekt zwischen den Stiften 2 und 3 aufweist. Analog hat eine Vorrichtung R17 nicht genügend Lötmittel am Stift 1. Die Vorrichtungen U13, R2, R17, etc. stellen typische elektronische Einrichtungen, wie etwa integrierte Schaltungschips, Widerstände, Kondensatoren, etc. dar. Zusätzlich kann der Prüfbericht statistische Zusammenfassungen aufweisen, welche eine Trendanalyse verschiedener Defekte und der Verfahrens-Steuerparameter vorsieht. Der Prüfbericht kann zudem Zusammenfassungen der Betrieb(sdaten) aufführen, welche die chronologische Abfolge des Maschinenbetriebes während einiger vergangener Zeitperioden darstellt. Die Betriebszusammenfassungen können einen Bericht der Maschinenverwendungsfaktoren aufweisen, die die Identifizierung der Bedienungspersonen; die Start- und Stoppzeiten und Daten für jede Schichtwechsel der Bedienungsperson; und die der in jeder Schicht verarbeitete Leiterplattenanzahl aufweisen.

Die komplette Zeit, welche zur Prüfung einer kompletten Leiterplatte unter Verwendung der oben beschriebenen Routine erforderlich ist, wird durch verschiedene Faktoren bestimmt.



Drei dieser Faktoren sind (1.) die Anzahl der Schnitte (Querschnittsbilder) an verschiedenen Z-Niveaus, welche für jede X-Y-Sichtposition notwendig sind, (2.) das Sichtgrößenfeld, d.h. die Fläche, welche durch jedes einzelne Bild abgedeckt wird, und (3.) die Größe der Leiterplatte, d.h. die komplette zu prüfende Fläche.

Für eine normale Leiterplattenprüfung können zwischen einem und bis zu acht Z-Schnitte in jeder X-Y-Position erforderlich sein, in Abhängigkeit von der Komplexität der Vorrichtungen auf der Platte und von dem Typ der Lötverbindungen. Die zu prüfende, pro Bild gewonnene Fläche stellt das Sichtfeld dar und beträgt in einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ungefähr 10,16 mm x 9,525 mm (0,400 inch x 0,375 inch). Dieses Sichtgrößenfeld bewirkt hochauflösende Bilder, wobei jedes Pixel Abmessungen in der Größenordnung von 20,32  $\mu$ m aufweist. Schließlich legt die Anzahl an X-Y-Sichtungen und Z-Schnitten, welche zum Abtasten einer speziellen Leiterplatte mosaikartig erforderlich sind die komplette Anzahl an erforderlichen Ansichten und somit den kompletten Zeitumfang fest, welcher für die Prüfung erforderlich ist.

Beispielsweise kann bei einer 15,24 cm x 22,86 cm (6" x 9") Leiterplatte-348 cm<sup>2</sup> (54 Quadratinches) eine 322,58 cm<sup>2</sup> (50 Quadratinches) große Fläche einer Prüfung bedürfen. Bei einer Größe von 96,77 mm<sup>2</sup> (0,15 Quadratinches) pro Sichtfeld (10,16 mm x 9,525 mm) (0,400 inches x 0,375 inches) sind ungefähr 360 X-Y-Sichtfeldpositionen erforderlich, um die komplette Platte abzudecken. Unter der Annahme, daß im Durchschnitt zwei Z-Schnitte an jeder Position erforderlich sind, sind somit für diese spezielle Leiterplatte 720 Bilder für eine komplette Prüfung notwendig. Bei einer Geschwindigkeit von 5 Bilder pro Sekunde beträgt die komplett erforderliche Zeit, um diese Platte zu prüfen, ungefähr 144 Sekunden.

Typische Prüfzeiten können von 20 Sekunden für sehr einfache

Leiterplatten bis zu 8 Minuten für größere komplexere Platten, welche einer hochauflösenden Prüfung erfordern, dauern.

### Automatisierte Analyse von Lötverbindungsdefekten

Die vorliegende Erfindung ist insbesondere für die Durchführung automatisierter (Über-) Prüfungen von Lötverbindungen zwischen auf Leiterplatten montierten elektronischen Bauteilen geeignet. Bei einem Ausführungsbeispiel wird dies erzielt, indem hochauflösende Röntgenstrahl-Querschnittsbilder der Lötverbindungen gewonnen und die Bilder mittels eines computergesteuerten, digitalen, Bildverarbeitungsverfahrens analysiert werden. Heutzutage gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Lötverbindungsdefekten, welche derart Weise analysierbar sind. Jedoch kann das wesentliche Grundprinzip der automatisierten Bildanalyse der Lötverbindung durch wenige grafisch dargestellte Beispiele verdeutlicht werden. Derartige Beispiele umfassen Lötmittelüberbrückungen zwischen benachbarten Verbindungspunkten, eine nicht ausreichende Lötmittelmenge an einer Verbindung und fehlendes Lötmedium an einer Verbindung.

Fig. 15 zeigt einen Bereich einer typischen Leiterplatte 210 auf welcher mehrere elektronische Vorrichtungen 212 und 1150 angeordnet sind, die durch eine Vielzahl von Lötverbindungen 214 verbunden sind. Um die Erläuterung der automatisierten Analyseverfahren zu vereinfachen, wird ein spezieller Typ einer elektronischen Vorrichtung und einer entsprechenden Lötverbindung bei der detaillierten Diskussion herausgegriffen. Die Erfindung ist jedoch nicht auf die ausgewählte spezielle Vorrichtung beschränkt und auf eine Vielzahl von anderen Vorrichtungstypen, Verfahren und elektrischen Verbindungen anwendbar ist. Insbesondere wird eine ein Oberflächenbefestigungsverfahren einsetzende Vorrichtung detail-

lierter beschrieben, jedoch ist die Erfindung auch auf viele andere Leiterplattentechnologien, einschließlich der "plated-through-hole" Technologie anwendbar.

Das Oberflächenbefestigungsverfahren (SMT) ist eine weit verbreitete Technik, wobei elektronische Vorrichtungen mit mit Metall beschichteten Verbindungsstiften mit entsprechenden, mit Metall beschichteten Verbindungsstiften auf der Oberfläche einer Leiterplatte verlötet werden. Fig. 16 zeigt eine typische SMT-Vorrichtung 212, welche in einer vergrößerten Position über der Befestigungsposition auf der Leiterplatte 210 dargestellt ist, mit welcher sie verbunden wird. Die elektronische Vorrichtung 212 umfaßt eine allgemein in der elektronischen Industrie verwendete Hülle, welche im Handel als bleiloser Chip-Träger (LCC) bekannt ist. Der LCC 212 umfaßt eine Vielzahl an metallaufweisenden Verbindungsstiften 1160 a, 1160b, 1160c, ..., 1160n, die direkt benachbart entsprechenden, metallaufweisenden jeweiligen Leiterplatten-Verbindungsstiften 1260a, 1260b, 1260c, ..., 1260n angeordnet werden, wenn der LCC in Bezug auf die Position auf der Leiterplatte 210 angeordnet wird. Die metallaufweisenden Stifte bzw. Elemente 1260 sind auf oder nahe der Oberfläche der Leiterplatte 210 ausgebildet und liefern elektrische Verbindungspunkte für die Verbindung der verschiedenen elektrischen Vorrichtungen 212 und 1150 mit der vervollständigten Leiterplattenanordnung.

Die Fig. 17 zeigt eine vergrößerte Ansicht eines Bereiches des LCC 212, welcher die allgemeine visuelle Erscheinung der Lötverbindungen darstellt, die zwischen fünf metallaufweisenden Verbindungsstiftpaaren 1160a/1260a bis 1160e/1260e ausgebildet sind. Die zwischen den Stiften 1160e und 1260e ausgebildete Lötverbindung 1360e ist beispielhaft für eine gute Verbindung mit keinen sichtbaren Defekten. Ein Lötmitteüberbrückungsdefekt 1370 ist zwischen benachbarten Lötverbindungen 1360a und 1360b dargestellt. Eine nicht genügend Lötmittel aufweisende Verbindung 1360c ist zwischen den

Elementen bzw. Stiften 1160c und 1260c gezeigt. Eine in der visuellen Erscheinungsform keine Defekte aufweisende Lötverbindung 1360d umfaßt jedoch innere Lücken bzw. Hohlräume. An der Verbindung 1360f zwischen den Stiften 1160f und 1260f ist kein Lötmedium dargestellt.

Fig. 18 zeigt die Erscheinungsform eines Röntgenstrahl-Querschnittsbildes des in Fig. 17 dargestellten Bereiches der LCC-Vorrichtung 212. Die durch das Querschnittsbild dargestellte Ebene ist zur Ebene parallel, welche durch die Leiterplatte 210 festgelegt ist und befindet sich ungefähr  $12,7 \mu\text{m}$  (0,0005 inch) über der Oberfläche der Leiterplatte. Die die Position der Vorrichtung 212, der Vorrichtungsverbindungselemente 1160 und der Leiterplatten-Verbindungselemente 1260 darstellenden gestrichelten Linien sind lediglich zu Vergleichszwecken dargestellt und müssen bei einem tatsächlichen Querschnittsbild nicht vorhanden sein. Die Bildbereiche 1360a', 1360b', 1360c', 1360d', 1360e' und 1370' entsprechen den Lötverbindungen 1360a, 1360b, 1360c, 1360d, 1360e bzw. dem Defekt 1370 in der bezeichneten Bildebene.

#### Bildanalyse zur Erfassung von Lötmediumüberbrückungsdefekten

Ein Lötmediumüberbrückungsdefekt tritt in Form von nicht erwünschtem Lötmedium zwischen Bahnen auf einer Leiterplatte, zwischen einem Verbindungselement und einer Bahn, zwischen zwei getrennten Verbindungselementen oder zwischen zwei getrennten Verbindungsstiften auf. Ein vergrößerter Bereich von Fig. 18 an der Position des Überbrückungsdefektbildes 1370' zwischen Verbindungselementen 1260a und 126b ist in Fig. 19 dargestellt. Ein willkürliches Pixelraster mit Spalten und Reihen ist zusätzlich dargestellt, um die Beschreibung des automatisierten Verfahrens zum Erfassen von Überbrückungsfehlern zu erleichtern.

Jeder Bildpixel ist einem Intensitätswert zugeordnet, wel-

cher der optischen Dichte des durch den Pixel dargestellten Bildes entspricht. Die Intensitätswerte bilden eine Graustufung, welche von Null (schwarz) bis 255 (weiß) reicht. Die Bilder der hochauflösenden Materialien, welche Röntgenstrahlen vollständig dämpfen bzw. abschwächen, d.h. Lötmaterial, werden durch relativ niedrige Intensitätswerte dargestellt, welche den dunkleren Grauschattierungen nahe dem schwarzen Ende der Grauskalierung bzw. Abstufung entsprechen. Umgekehrt erzeugen Materialien mit geringer Dichte, d.h. Kunststoffleiterplatten, Bilder mit Intensitätswerten, welche den helleren Grauschattierungen nahe dem weißen Ende der Grauskalierung entsprechen. Bilder mit diesem Grauskalierungstyp sind als "positive" Bilder bekannt. Das Verhältnis zwischen Graustufen und Intensität kann umgekehrt werden, um allgemein bekannte "negative" Bilder zu erzeugen. Es können sowohl negative als auch positive Bilder bei der Erfindung verwendet werden, jedoch werden zu Erläuterungszwecken positive Bilder verwendet. Deshalb entsprechen innerhalb der Lötmaterialmaterial-Bildbereiche, d.h. die Bereiche 1360, befindliche Pixel relativ niedrigen Bildintensitätswerten. In anderen Bildbereichen befindliche Pixel, stellen Materialien mit geringer Dichte dar, d.h. die Kunststoffleiterplatte, und entsprechen relativ hohen Bildintensitätswerten.

Der Anfangsschritt der Bildanalyse umfaßt das Aufnehmen von topographischen Daten und Prüfparametern, welche zur Durchführung einer Prüfung und Bewertung eines Lötmaterialüberbrückungsdefektes erforderlich sind. Bei einem Ausführungsbeispiel der Erfindung umfaßt ein Datenfile diese speziellen Informationen für jede durchzuführende Bildanalyse. Sobald die Leiterplatte identifiziert wurde, wird der Datenfile für diesen speziellen Plattentyp wieder aufgerufen und im Speicher des (der) Analysecomputer(s) angeordnet. Ein zur Analyse eines Bildes für die Anwesenheit eines Lötmaterialüberbrückungsdefektes verwendeter Algorithmus setzt als Eingang die Schwerpunktposition und die Grenzen des Leiterplatten-



Verbindungsstiftes 1260, eine vorgegebene Suchwegposition und einen vorgegebenen Differenzial-Grauschwellenwert ein. Wie beispielsweise in Fig. 19 dargestellt, umfaßt das Datenfile Informationen, daß der Schwerpunkt 1378 des Verbindungselementes 1260a an den Spalten- und Reihenpixelkoordinaten (C50 R75) angeordnet ist. Zusätzlich umfaßt das Datenfile die Information, daß die Pixelbreite des Elementes 1260a die Differenz zwischen den Pixelspaltenzahlen C75 und C25 ist, und daß die Weglänge die Differenz zwischen den Pixelreihennummern R125 und R25 beträgt. Jede weiteren Prüfparameter, wie etwa der Differenzial-Grauschwellenwert und die Suchwegposition und -abmessungen, welche zum Durchführen der Defektanalyse des Überbrückungslötmittels erforderlich sind, können auch aus dem Datenfile wiedergewonnen werden.

Das Verfahren zum Analysieren der Querschnitts-Röntgenbilder einer Lötverbindung nach einem Lötmittelüberbrückungsdefekt ist in Fig. 19 mit Bezug auf die Lötverbindung 1360a' dargestellt. Vorzugsweise liegt die Ebene des Querschnittsbildes in einer Ebene, welche im wesentlichen parallel zur Leiterplattenebene ist und sich ungefähr  $12,7 \mu\text{m}$  (0,0005 inch) über der Oberfläche der Leiterplatte befindet. Das Verfahren umfaßt im wesentlichen die Bestimmung von unerwünschtem Lötmittel entlang einem Suchweg bzw. Pfad vom Bild, welcher die interessierende Lötverbindung vollständig umgibt.

Mittels der topografischen Daten des Elementes 1260a fährt ein Analysealgorithmus fort einen Suchweg 1380 und die Grenzen des Elementes einschließlich der Wegsegmente 1380a, 1380b, 1380c, 1380d festzulegen. Der Suchweg ist einen Pixel breit und mit einem vorgegebenen Abstand von den Elementengrenzen angeordnet. Bei dem Ausführungsbeispiel, in welchem das digitale Bild 512 Spalten und 480 Reihen aufweist und einer Fläche auf der Leiterplatte von ungefähr  $10,16 \text{ mm} \times 9,525 \text{ mm}$  (0,400 inch  $\times$  0,375 inch) entspricht, entspricht eine Pixelbreite einem Abstand von ungefähr  $19,812 \mu\text{m}$  (0,00078 inch) auf der Leiterplatte. Der vorgegebene Abstand

zwischen den Elementgrenzen und dem Suchweg in Fig. 19 entspricht der Differenz zwischen den Pixelspalten C95 und C75 und der Differenz zwischen den Pixelreihen R12 und R25. Der vorgegebene Abstand kann empirisch ausgewählt werden, um den Anforderungen an jede spezielle Analyseanwendung zu entsprechen.

Die Bildintensität jedes Pixels mit dem Suchweg 1380 wird mit der Intensität der benachbarten Pixel im Suchweg verglichen, um einen Differenzial-Grauwert  $\Delta G$  zu bestimmen. Die Bildintensität oder der Grauwert des speziellen Pixels wird durch  $I_{CR}$  gegeben. Der Differenzialgrauwert  $\Delta G_{1,2}$  zwischen zwei benachbarten Pixel 1 und 2 wird anschließend ermittelt, indem die Differenz zwischen ihren jeweiligen Intensitäten  $I_1$  und  $I_2$  berechnet wird. Jeder Differenzial-Grauwert  $\Delta G_{1,2}$  wird anschließend mit einem vorgegebenen Schwellenwert  $\Delta G_{Th}$  verglichen. Der Schwellenwert wird derart ausgewählt, daß angezeigt wird, wenn ein Pixel in einem Lötmittelbereich des Bildes und der benachbarte Pixel in einem Leiterplattenbereich des Bildes angeordnet sind. Die Anwesenheit des unerwünschten Lötmittels entlang des Suchweges wird angezeigt, wenn ein Differenzial-Grauwert den Schwellenwert übersteigt. Es wird beispielsweise angenommen, daß eine Suche an einer Ecke 1382 des Suchpfades 1380 beginnt, welche an einem ersten Pixel (C95, R5) mit einer Intensität  $I_1$  angeordnet ist und entlang der Spalte C95 zum nächsten benachbarten Pixel auf dem Wegsegment 1380a zu einem zweiten Pixel (C95, R6) mit einer Intensität  $I_2$  fortfährt. Diese Startposition ist willkürlich gewählt und jede andere Position entlang des Suchweges kann auch als Beginn der Suche ausgewählt werden. Der Differenzial-Grauwert für diese ersten beiden benachbarten Pixel beträgt:

$$\Delta G_{1,2} = I_1 - I_2 = I_{C95, R5} - I_{C95, R6} \quad (7)$$

Wenn der Absolutwert des Differenzialgrauwertes  $|\Delta G_{1,2}|$  größer als oder gleich dem Schwellenwert  $\Delta G_{Th}$  ist, werden

anschließend die Positionen der Pixel und das Vorzeichen, d. h. positiv oder negativ, des Differenzialgrauwertes als Kandidat-Defektzeichen  $D_i$  gespeichert, wobei  $i$  eine ganze Zahl entsprechend der Reihenfolge darstellt, in welcher die Defektmarkierung aufgefunden wurde, wobei  $i$  eine ganze Zahl entsprechend der Größenordnung darstellt, bei welcher das Defektzeichen aufgefunden wurde. Beispielsweise entspricht  $D_1$  dem ersten Defektzeichen, welches entlang des Suchweges 1380 von der Startposition 1382 aufgefunden wurde,  $D_2$  entspricht dem zweiten aufgefundenen Defektzeichen, usw.

Bei dem in Fig 19 dargestellten Beispiel wurde ein erstes Defektzeichen  $D_1$  bei einem Pixel K gefunden, welches ungefähr bei (C95, R55) positioniert ist. Wenn sich das Pixel K in dem Lötmitteľdefekt-1370'-Bereich des Bildes befindet, dann ist das vorherige ungefähr bei (C95, R54) angeordnete Pixel K-1 im Suchweg vermutlich außerhalb des Lötmitteľbereiches und hat einen höheren Intensitätswert als das Pixel K. Somit ist ein geeignet gewählter  $\Delta G_{Th}$  kleiner als der absolute Wert eines Differenzialgrauwertes  $|\Delta G_{K-1,K}|$ , welcher von den Intensitäten  $I_{K-1}$  und  $I_K$  dieser beiden benachbarten Pixel K-1 und K abgeleitet wird. Zudem weist  $\Delta G_{K-1,K}$  ein positives Vorzeichen auf. Analog wird ein zweites Defektzeichen  $D_2$  bei einem Pixel M gefunden, welches ungefähr bei (C95, R90) angeordnet ist. Wenn das Pixel M sich im Lötmitteľdefekt 1370' Bereich des Bildes befindet, dann ist das nachfolgende ungefähr bei (C95, R91) angeordnete Pixel M+1 im Suchweg außerhalb des Lötmitteľbereiches und hat einen höheren Intensitätswert als das Pixel M. Somit ist der von den Intensitäten  $I_M$  und  $I_{M+1}$  dieser beiden benachbarten Pixel M und M+1 abgeleitete Differenzialgrauwert  $|\Delta G_{M,M+1}|$  größer als  $\Delta G_{Th}$ . Zusätzlich weist  $\Delta G_{M,M+1}$  ein negatives Vorzeichen auf. Die Anwesenheit des Überbrückungsdefektes 1370' bzw. Brückendefektes wird somit angezeigt, wenn das Defektzeichen  $D_1$  positiv und das nächste Defektzeichen  $D_2$  negativ ist.

Die Suche nach Defektzeichen setzt sich um den Weg 1380 fort, bis der komplette Weg geprüft wurde. Ein Bericht aller gefundenen Überbrückungen wird anschließend aufgezeichnet und dargestellt.

Ein den Vorgang zum automatischen Lokalisieren von Lötmit-telüberbrückungsdefekten darstellendes Flußdiagramm ist in Fig. 20 gezeigt. Beginnend bei der Betriebseinheit 1400 werden die topographischen Daten und andere Prüfparameter für das geprüfte spezielle Verbindungselement aus dem Speicher des Analysecomputers wieder aufgerufen. Fortfahrend über einen Weg 1402 zu einer Betriebseinheit 1404 wird der Suchweg um das Verbindungselement mittels der in dem Speicher des Computers gespeicherten topographischen Daten und anderer Prüfparameter definiert. Die Steuerung läuft anschließend über den Weg 1406 zur Betriebseinheit 1408, wobei die Suchwegabtastung initialisiert wird, indem eine Pixel-zähleinrichtung "i" und eine Defektzeichenzähleinrichtung "j" gleich 1 gesetzt werden.

Eine erste Schleife mit den Betriebseinheiten 1412, 1416, 1420, 1424, 1428 und 1434 wird durch einen Weg 1410 von der Betriebseinheit 1408 erreicht. In der ersten Schleife wird jeder Pixel einschließlich des Suchweges geprüft, die Differenzialgrauwerte berechnet und die Kandidaten-Defektpositionen für eine Weiterverarbeitung zu einem späteren Zeitpunkt identifiziert und abgespeichert. In der ersten Betriebseinheit 1412 der Schleife wird der Differenzialgrauwert  $\Delta G_{1,2}$  für die ersten und zweiten Pixel im Suchweg berechnet. Dieser Wert wird durch einen Weg 1414 zu einer Entscheidungseinheit bzw. einem Entscheidungsblock 1416 weitergeleitet, wobei der Absolutwert des Differenzialgrauwertes  $|\Delta G_{1,2}|$  mit dem vorgegebenen Schwellenwert  $\Delta G_{Th}$  verglichen wird. Wenn  $|\Delta G_{1,2}|$  größer oder gleich  $\Delta G_{Th}$  ist, fährt die Steuerung über einen Weg 1418 zu einer Betriebseinheit 1420 fort. In der Betriebseinheit 1420 werden die Positionen der Pixel 1 und 2 und das Vorzeichen von  $\Delta G_{1,2}$

als erstes Defektzeichen  $D_1$  abgespeichert. Die Steuerung läuft über einen Weg 1422 zu einer Betriebseinheit 1424 weiter, wobei die Defektzähleinrichtung "j" um eins erhöht wird. In einer die letzte Einheit der ersten Schleife bildenden Entscheidungseinheit 1428, welche durch einen Weg 1426 erreicht wird, wird eine komplette Prüfung durchgeführt, um zu bestimmen, ob der komplette Suchweg überprüft wurde. Falls nicht geht die Steuerung über einen Weg 1432 zu einer Betriebseinheit 1434 weiter, wobei die Suchweg-Pixelzähleinrichtung "i" um eins erhöht wird. Die Steuerung kehrt anschließend über den Weg 1436 zum Beginn der ersten Schleife an der Betriebseinheit 1412 zurück. Die erste Schleife wird wiederholt, bis alle Pixel einschließlich des Suchweges analysiert wurden, worauf die Steuerung aus der ersten Schleife bei der Entscheidungseinheit 1428 über den Weg 1438 heraus und zur Betriebseinheit 1440 geht.

Bei der Betriebseinheit 1440 wird die Defektzähleinrichtung "j" wiederum auf den Wert eins initialisiert, bevor in die zweite Schleife über den Weg 1442 eingetreten wird. Die zweite Schleife umfaßt die Einheiten 1444, 1448, 1452 und 1458. In der zweiten Schleife werden die in der ersten Schleife identifizierten Defektzeichen  $D_j$  geprüft, um die Positionen der Lötmittelüberbrückungsdefekte entlang des Suchweges zu bestimmen. Wenn in die zweite Schleife bei der Entscheidungseinheit 1444 bei  $j=1$  eingetreten wird, werden die Vorzeichen der Defektzeichen  $D_1$  und  $D_2$  bestimmt. Wenn  $D_1$  positiv und  $D_2$  negativ ist, läuft die Steuerung anschließend über den Weg 1446 zur Betriebseinheit 1448 fort, wobei die Positionen  $D_1$  und  $D_2$  aufgezeichnet werden und ein Lötmittelüberbrückungsdefekt wird am Suchwegsegment zwischen  $D_1$  und  $D_2$  aufgenommen. Die Steuerung fährt anschließend über den Weg 1450 zu einer Entscheidungseinheit 1452 fort, bei welcher ein kompletter Test durchgeführt wird, um festzustellen, ob alle Defektzeichen  $D_j$  analysiert wurden. Falls nicht, geht die Steuerung über den Weg 1456 zu einer Betriebseinheit 1458, bei welcher die Defektzähleinrichtung



"j" um eins erhöht wird. Die Steuerung kehrt anschließend über den Weg 1460 zum Beginn der zweiten Schleife an der Entscheidungseinheit 1444 zurück. Die zweite Schleife wird wiederholt, bis alle entlang des Suchweges in der ersten Schleife angeordneten Defektzeichen  $D_j$  auf den Lötmittelüberbrückungsdefekt analysiert wurden. Die Steuerung verläßt anschließend die zweite Schleife von der Entscheidungseinheit 1452 über den Weg 1462 zu einer Betriebseinheit 1464. In der Einheit 1464 wird ein Bericht über alle entlang des Suchweges gefundenen Lötmittelüberbrückungsdefekte erzeugt und für ein späteres Wiederaufrufen gespeichert.

Bildanalyse zum Erfassen von Defekten aufgrund von fehlendem  
oder nicht ausreichendem Lötmittel

Ein Defekt aufgrund von fehlendem Lötmittel ist derart definiert, daß an einer Verbindung mit einem elektronischen Vorrichtung-Verbindungselement und einem entsprechendem Leiterplatten-Verbindungselement im wesentlichen kein oder eine sehr geringe Menge an Lötmittel vorhanden ist. Ein Defekt aufgrund von nicht ausreichendem Lötmittel ist derart definiert, daß an der Verbindung eine gewisse Menge an Lötmittel präsent ist, dies jedoch nicht ausreicht eine geeignete Naht auszubilden, oder der Verbindung eine ausreichende Festigkeit zu verleihen. Ein vergrößerter Bereich von Fig. 18 an der Position des Defektbildes 1360c' mit nicht genügendem Lötmittel zwischen den Verbindungselementen 1160c und 1260c ist in Fig. 21 dargestellt. Ein willkürliches Pixelraster mit Spalten und Reihen ist zudem dargestellt, um die Beschreibung des automatisierten Verfahrens zum Erfassen von Defekten aufgrund von fehlendem oder nicht ausreichendem Lötmittel zu erleichtern.

Ein Verfahren zum Analysieren des Querschnitt-Röntgenbildes einer Lötmittelverbindung mit einem Defekt aufgrund von

fehlendem oder nicht ausreichendem Lötmedium ist in Fig. 21 mit Bezug auf das Lötmediumverbindungsbild 1360c' dargestellt. Vorzugsweise liegt die Querschnittsbildebene in einer Ebene, welche im wesentlichen parallel zur Leiterplattenoberfläche angeordnet ist. Das Verfahren umfaßt im wesentlichen die Bestimmung der Dicke der Lötmediumverbindung in verschiedenen speziellen Bereichen des Bildes.

In Fig. 22 sind drei spezielle Bereiche einer Lötmediumverbindung festgelegt. Fig. 22 ist eine Querschnittsansicht einer typischen geeigneten Lötmediumverbindung, wie etwa die Verbindung 1360e. Die Querschnittsansicht wurde entlang der Linie 22-22 in Fig. 17 ausgebildet. Ein erster Bereich 1501 der Verbindung 1360e, welche zwischen dem Vorrichtungselement 1360 und dem Leiterplatten-Verbindungselement 1260 angeordnet ist, wird als "Element" oder Block der Verbindung bezeichnet. Ein zweiter Bereich 1502, welcher ungefähr an einer Seitenwand 1505 der Vorrichtung 212 beginnt und ungefähr zu einem Punkt 1506 zwischen der Wand 1505 und einem Rand 1507 des Elementes 1260 verläuft, wird als "Fuß"-Bereich der Verbindung 1360e bezeichnet. Ein dritter Bereich 1503, welcher ungefähr am Punkt 1506 beginnt und ungefähr zum Rand 1507 des Elementes 1260 verläuft wird als "Spitzen"-Bereich der Verbindung 1360e bezeichnet.

Normalerweise umfaßt der Elementbereich 1501 eine nahezu gleichmäßige Lötstellendicke, welche relativ dünn ist. Der Fußbereich 1502 ist im allgemeinen mit keiner gleichförmigen Dicke ausgestaltet und umfaßt den dicksten Bereich der Verbindung. Der Spitzenbereich 1503 hat im wesentlichen eine gleichmäßigere Dicke als der Fuß, ist jedoch nicht genauso dick. Die Lötmediummenge, welche die Verbindung 1360e aufweist, kann aus Messungen der Durchschnittsdicke des Lötmediums in jedem der drei Bereiche 1501, 1502 und 1503 abgeschätzt werden.

Bei einem laminographischen Querschnittsbild des Lötmittelmaterials, normalerweise eine Mischung aus Blei und Zinn, besteht eine Beziehung zwischen der Intensität des Bildes und der Dicke des das Bild ausbildenden Lötmittelmaterials. Die Fig. 23a zeigt ein Beispiel dieser allgemeinen Beziehung. Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, daß die Bildintensität von Werten, welche einer helleren Graustufung (weiß) entsprechen, zu Werten, welche dunkleren Graustufen (schwarz) entsprechen, abnimmt, wenn die Lötmittelmaterieldicke zunimmt. D.h. das Bild eines dünnen Lötmittelbereiches hat einen Bildintensitätswert, welcher größer als der Bildintensitätswert des Bildes eines dickeren Lötmittelbereiches ist. Das Bild des dünneren Bereiches erscheint als hellere Graustufung als das Bild des dickeren Bereiches. Diese Beziehung kann mittels eines Kalibrierungsstufenkeils mit einer Vielzahl an Stufen mit unterschiedlichen Dicken kalibriert werden. Ein Beispiel für einen derartigen Stufenkeil 1560 ist in Fig. 23b dargestellt. Der Stufenkeil 1560 besteht aus Lötmittelmateriale und umfaßt 10 Stufen 1571 bis 1580 mit Dicken, welche von 25,4  $\mu\text{m}$  bis 254  $\mu\text{m}$  in Abstufungen von 25,4  $\mu\text{m}$  (0,001 inch bis 0,010 inch in Abstufungen von 0,001 inch) reichen. Ein Röntgenstrahl laminographisches Querschnittsbild des Stufenkeils 1560, welches entlang einer Ebene mit der Linie 1590 und parallel zu einer Basis 1592 des Keils aufgenommen wurde, zeigt die Bildintensität-Lötmitteldickebeziehung, welche in Fig. 23c dargestellt ist. Da die Dicken der Stufen 1571 bis 1580 bekannt sind, können die entsprechenden Intensitäten 1571' bis 1580' mit Intensitäten anderer Querschnittsbilder des Lötmittelmaterials verglichen werden, von welchen die Dicken nicht bekannt sind, um die unbekannten Dicken zu bestimmen.

Der Anfangsschritt der Analyse umfaßt die Gewinnung von topographischen Daten und Prüfparametern, welche für die Durchführung einer Prüfung und Bewertung eines Defekts aufgrund von fehlendem oder nicht ausreichendem Lötmittel erforderlich sind. Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung

liefert ein Datenfile mit speziellen Informationen für jede auszuführende Analyse. Ein Algorithmus für das Analysieren eines Bildes auf die Anwesenheit eines Defektes aufgrund von fehlendem oder nicht ausreichendem Lötmedium setzt als Eingang die Flächenschwerpunktposition und die Grenzen des Verbindungselementes, drei Prüffenster und Schwellenwerte ein. Bei diesem Ausführungsbeispiel umfaßt das Datenfile die Information, daß der Flächenschwerpunkt 1679 des Verbindungselementes 1260c an Spalten- und Reiheinpixelkoordinaten (C100, R62) in Fig. 21 angeordnet ist. Zusätzlich kann das Datenfile die Information aufweisen, daß die Pixellänge des Elementes 1260c die Differenz zwischen der Pixelspaltenzahl C50 und C150 und daß die Elementbreite die Differenz zwischen den Pixelspaltenzahlen R75 und R50 beträgt. Jede weiteren für das Durchführen der Analyse notwendigen Prüfparameter können auch aus dem Datenfile entnommen werden.

Unter Verwendung der topographischen Daten und Prüfparameter einer Defektanalyse des Bildes 1360c' am Element 1260c auf fehlendes oder nicht ausreichendes Lötmedium fährt der Bildanalysealgorithmus fort die Grenzen der drei in Fig. 21 dargestellten Prüffenster 1601, 1602 und 1603 festzulegen. Jedes Fenster ist rechteckig und mit einer vorgegebenen Distanz von den Grenzen und dem Flächenschwerpunkt des Elementes angeordnet. Das erste Fenster 1601 wird durch vier Ecken mit Pixelkoordinaten (C55, R55), (C55, R70), (C85, R70) und (C85, R55) festgelegt. Das Fenster 1601 überlappt im wesentlichen den Elementbereich 1501 der Lötmediumverbindung. Das zweite Fenster 1602 wird durch vier Ecken mit Pixelkoordinaten (C95, R55), (C95, R70), (C120, R70) und (C120, R55) festgelegt. Das Fenster 1602 überlappt im wesentlichen den Fußbereich 1502 der Lötmediumverbindung. Das dritte Fenster 1603 wird durch vier Ecken mit Pixelkoordinaten (C125, R55), (C125, R70), (C145, R70) und (C145, R55) definiert. Das Fenster 1603 überlappt im wesentlichen den Spitzenbereich 1503 der Lötmediumverbindung.

Die Durchschnittsbildintensität innerhalb eines Fensters wird durch Aufsummieren der Bildintensitäten aller Pixel einschließlich des Fensters und Dividieren durch die komplette Pixelanzahl, welche zur Summe beitragen, bestimmt. Die derart abgeleiteten Durchschnittsintensitäten von dem Elementbereichfenster 1601, dem Fußbereichfenster 1602 und dem Spitzenbereichfenster 1603 werden als  $I_p$ ,  $I_H$  bzw.  $I_T$  bezeichnet. Diesen vorher diskutierten Durchschnittsintensitäten werden Direktdurchschnittsdicken  $T_p$ ,  $T_H$  bzw.  $T_T$  des Lötmittels in jedem der jeweiligen Bereiche zugeordnet. Die Anwesenheit eines Defektes aufgrund von fehlendem oder nicht ausreichendem Lötmittel wird bestimmt, indem diese Durchschnittsdicken  $T_p$ ,  $T_H$  und  $T_T$  mit vorgegebenen Dicke-Schwellenwerten  $Th_{M,p}$ ,  $Th_{M,H}$ ,  $Th_{M,T}$ ,  $Th_{I,p}$ ,  $Th_{I,H}$ , und  $Th_{I,T}$  verglichen werden. Im allgemeinen sind die Schwellenwerte aufgrund des fehlenden Lötmittels  $Th_{M,p}$ ,  $Th_{M,H}$ , und  $Th_{M,T}$ , welche den Element-, Fuß- bzw. Spitzenbereichen entsprechen, kleiner als die Schwellenwerte für nicht ausreichendes Lötmittel  $Th_{I,p}$ ,  $Th_{I,H}$ , und  $Th_{I,T}$ . Das heißt  $Th_{M,p} < Th_{I,p}$ ,  $Th_{M,H} < Th_{I,H}$  und  $Th_{M,T} < Th_{I,T}$ . Insbesondere wenn  $T_p < Th_{M,p}$ ,  $T_H < Th_{M,H}$  und  $T_T < Th_{M,T}$  dann wird die Verbindung als fehlendes Lötmittel dargestellt. Wenn  $Th_{M,p} < T_p < Th_{I,p}$ ,  $Th_{M,H} < T_H < Th_{I,H}$  und  $Th_{M,T} < T_T < Th_{I,T}$  dann wird die Verbindung als nicht ausreichendes Lötmittel aufgezeichnet.

Ein das Verfahren zum automatischen Lokalisieren von Defekten aufgrund von fehlendem oder nicht ausreichenden Lötmittel darstellendes Flußdiagramm ist in Fig. 24 dargestellt. Beginnend bei einer Betriebseinheit 1700 werden die topographischen Daten und anderen Prüfparameter für das zu analysierende spezielle Verbindungselement wieder aus dem Speicher des Analysecomputers aufgerufen. Fortfahrend über einen Weg 1702 zu einer Betriebseinheit 1704 werden die Prüffenster für die Element-, Fuß- und Spitzenbereiche der Lötmittelverbindung mittels der in dem Speicher des Computers gespeicherten topographischen Daten und anderer



Prüfparameter festgelegt. Die Steuerung fährt anschließend über einen Weg 1706 zu einer Betriebseinheit 1708 fort, wobei die Durchschnittsbildintensität innerhalb jedes Fensters bestimmt und die entsprechende Durchschnitts-Lötmitteldicke berechnet wird. Die Steuerung geht anschließend zu einer Entscheidungseinheit 1712 über einen Weg 1710.

In der Entscheidungseinheit 1712 werden die Durchschnittslötmitteldicken  $T_p$ ,  $T_H$  und  $T_T$  innerhalb der Fenster mit den Dickschwellenwerten für nicht ausreichendes Lötmittel  $Th_{I,p}$ ,  $Th_{I,H}$  bzw.  $Th_{I,T}$  verglichen. Wenn die Durchschnittsdicken nicht kleiner als die Schwellenwerte für nicht ausreichendes Lötmittel sind, läuft die Steuerung über den Weg 1714 zum Ende der Analyseroutine. Wenn die Durchschnittsdicken kleiner als die Schwellenwerte für nicht ausreichendes Lötmittel sind, geht die Steuerung über den Weg 1718 zur Entscheidungseinheit 1720. In der Entscheidungseinheit 1720 werden die Durchschnittsdicken  $T_p$ ,  $T_H$  und  $T_T$  mit den Dickschwellenwerten für fehlendes Lötmittel  $Th_{M,p}$ ,  $Th_{M,H}$  bzw.  $Th_{M,T}$  verglichen. Wenn die Durchschnittsdicken nicht kleiner als die Schwellenwerte für fehlendes Lötmittel sind, läuft die Steuerung über den Weg 1722 zu einer Betriebseinheit 1724, wobei die Anwesenheit eines Defektes aufgrund von zu wenig Lötmittel aufgezeichnet wird. Die Steuerung geht dann über den Weg 1726 zum Ende der Analyseroutine. Wenn die Durchschnittsdicken kleiner als die Schwellenwerte für fehlendes Lötmittel in der Entscheidungseinheit 1720 sind, läuft die Steuerung über den Weg 1728 zur Betriebseinheit 1730, wobei die Anwesenheit eines Defektes aufgrund von fehlendem Lötmittel aufgenommen wird. Die Steuerung geht dann über den Weg 1732 zum Ende der Routine.

Das obig beschriebene System und die Vorgänge wurden hauptsächlich zur Prüfung von Lötmittelverbindungen auf Leiterplatten entwickelt. Jedoch kann die Erfindung auch zur Prüfung anderer Gegenstände und Merkmale eingesetzt werden. Während die obige Beschreibung ein bevorzugtes Ausführungs-

beispiel der Erfindung aufweist, welches zur Prüfung von Lötmittelverbindungen zwischen elektronischen Vorrichtungen auf Leiterplatten angewendet wird, bestehen andere Anwendungen, welche dem Durchschnittsfachmann ersichtlich sind.

Die Erfindung kann mit anderen Anordnungen ausgebildet werden, ohne deren wesentliche Eigenschaften zu verlassen. Die beschriebenen Ausführungsbeispiele sollen lediglich als beschreibend und nicht als einschränkend angesehen werden. Der Schutzzumfang der Erfindung wird deshalb durch die beigefügten Ansprüche als auch durch die vorgenannte Beschreibung bezeichnet. Alle Änderungen, welche eine äquivalente Bedeutung und einen äquivalenten Umfang wie die Ansprüche aufweisen, sind durch deren Schutzzumfang abgedeckt.

### Ansprüche

1. Vorrichtung zum Prüfen einer elektrischen Verbindung (214) zwischen elektrischen, auf einer Leiterplatte (210) befestigten Bauteilen (212), gekennzeichnet durch:  
  
ein Abbildungssystem (200, 240), welches ein Querschnittsbild einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214) erzeugt, wobei das Abbildungssystem (200, 240) ferner umfaßt:  
  
eine durchdringende Strahlungsquelle (200), welche die elektrische Verbindung (214) mit zur elektrischen Verbindung (214) von mehreren Quellenpositionen (280) gerichteter durchdringender Strahlung beleuchtet; und  
  
einen Strahlungsdetektor (240), welcher die durchdringende Strahlung empfängt, nachdem sie durch die elektrische Verbindung (214) hindurchgelaufen ist, wobei der Strahlungsdetektor (240) einen Ausgang aufweist, welcher der Position und der Intensität der durch den Strahlungsdetektor (240) aufgefangenen durchdringenden Strahlung entsprechende Signale abgibt; und  
  
ein Analysesystem (270, 272), welches die Positionssignale und Intensitätssignale der durchdringenden Strahlung verknüpft, um eine Bilddatenbasis auszubilden, welche Information aufweist, die ausreicht, um ein Querschnittsbild einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214) auszubilden, wobei das Analysesystem (270, 272) ferner die Datenbasis analysiert, welche für das Querschnittsbild einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214) repräsentativ ist, um eine Messung der Qualität der elektrischen Verbindung (214) zu bestimmen.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Abbildungssystem (200, 240) eine Röntgenstrahl-Quel-

le (200) und einen Röntgenstrahl-Detektor (240) aufweist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Abbildungssystem (200, 240) Röntgenstrahl-Laminographen der elektrischen Verbindung (214) erzeugt.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Röntgenstrahl-Laminographen durch die Bewegung der Röntgenstrahl-Quelle (200) und des Röntgenstrahl-Detektors (240) mit Bezug auf die elektrische Verbindung (214) erzeugt werden.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegung der Röntgenstrahl-Quelle (200) durch eine elektrische Einrichtung (281) und die Bewegung des Röntgenstrahl-Detektors (240) durch eine elektromechanische Einrichtung (256) erzeugt werden, wobei die Bewegungen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und des Röntgenstrahl-Detektors (240) durch ein elektrisches Rückkopplungssystem (260) synchronisiert und gesteuert werden.
6. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegungen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und des Röntgenstrahl-Detektors (240) im wesentlichen kreisförmig sind und eine Quellenebene (62) und eine Detektorebene (64) festlegen.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Quellenebene (62) und die Detektorebene (64) im wesentlichen parallel sind.
8. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Abbildungssystem ein computergestütztes Tomographie-system aufweist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß

das Analysesystem (270, 272) nach speziellen Merkmalen im Querschnittsbild einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214) sucht und die speziellen Merkmale identifiziert, indem vorgegebene Tests an dem Querschnittsbild einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214) an vorgegebenen Bildpositionen durchgeführt werden.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eines der speziellen Merkmale einen Lötmittelüberbrückungsdefekt (1370) aufweist.
11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß einer der durch das Bildanalysesystem (270, 272) durchgeführten, vorgegebenen Tests eine Reihe von Differenzialbild-Intensitätsgrauwerten entlang eines die elektrische Verbindung (214, 1360a') umgebenden Randes (1380) berechnet und die Differenzial-Grauwerte mit einem vorgegebenen Schwellengrauwert vergleicht.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Lötmittelüberbrückungsdefekt (1370) durch das Bildanalysesystem (270, 272) an Positionen entlang des Randes (1380) identifiziert wird, bei welcher die berechneten Differenzialbild-Intensitätsgrauwerte den vorgegebenen Schwellengrauwert übersteigen.
13. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eines der speziellen Merkmale die Menge des an der elektrischen Verbindung (214, 1360c') vorliegenden Lötmittels aufweist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß einer der durch das Bildanalysesystem (270, 272) durchgeführten, vorgegebenen Tests drei Bereiche des Querschnittsbildes (1601, 1602, 1603) entsprechend drei unterschiedlichen Bereichen (1501, 1502, 1503) einer



elektrischen Verbindung (214, 1306c') festlegt, eine Durchschnittsbildintensität ( $I_p$ ,  $I_H$ ,  $I_T$ ) für jeden der drei Bereiche berechnet und die Durchschnittsbildintensitäten mit einem ersten und einem zweiten Satz von vorgegebenen Schwellenwerten ( $Th_{I,p}$ ,  $Th_{I,H}$ ,  $Th_{I,T}$ ;  $Th_{M,p}$ ,  $Th_{M,H}$ ,  $Th_{M,T}$ ) vergleicht.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß das Bildanalysesystem (270, 272) einen Defekt aufgrund von fehlendem Lötmedium (1360f) an Positionen feststellt, an welchen die Durchschnittsbildintensitäten kleiner als sowohl der erste als auch der zweite Satz von vorgegebenen Schwellenwerten ( $Th_{I,p}$ ,  $Th_{I,H}$ ,  $Th_{I,T}$ ;  $Th_{M,p}$ ,  $Th_{M,H}$ ,  $Th_{M,T}$ ) ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß das Bildanalysesystem (270, 272) einen Defekt (1360c) aufgrund von zu wenig Lötmedium an Positionen identifiziert, an welchen die Durchschnittsbildintensitäten kleiner als der erste Satz von vorgegebenen Schwellenwerten und größer als der zweite Satz von vorgegebenen Schwellenwerten ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß:

die durchdringende Röntgenstrahl-Quelle (200) ferner umfaßt:

eine Röntgenstrahl-Quelle (200), bei welcher die Röntgenstrahlen (282) durch einen Elektronenstrahl (285) erzeugt werden, welcher auf ein Ziel (287) auftrifft; und

eine elektrische Steuer- bzw. Lenkeinrichtung (281), zum Ablenken des Elektronenstrahls (285) zu unterschiedlichen Bereichen des Ziels (287), so daß die Position

(280) bewegt wird, wobei die Röntgenstrahlen (282) durch die Röntgenstrahl-Quelle (200) erzeugt werden;

der Röntgenstrahl-Detektor (240) ferner umfaßt:

einen Röntgenstrahl-Detektor (240, 250), welcher derart angeordnet ist, daß er Röntgenstrahlen (280) empfängt, welche durch die Röntgenstrahl-Quelle (200) erzeugt wurden; und

eine Einrichtung (256) zum Bewegen der Position des Röntgenstrahl-Detektors (240, 250), und

das Abbildungssystem (200, 240) ferner ein Rückkopplungssystem (260, 263, 265) zum Synchronisieren der Bewegung der Röntgenstrahl-Quelle (200) mit der Bewegung des Röntgenstrahl-Detektors (240, 250) aufweist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, gekennzeichnet durch ein Vergleichselement (730), welches ein Vergleichselementbild (830) auf dem Röntgenstrahl-Detektor (240, 250) ausbildet, wenn das Vergleichselement (730) zwischen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und dem Röntgenstrahl-Detektor (240, 250) positioniert ist.
19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Rückkopplungssystem (260, 263, 265) die elektrische Steuereinrichtung (281) in Abhängigkeit von der Bewegung des Röntgenstrahl-Detektors (240, 250) derart antreibt, daß das Vergleichselementbild (830) des Vergleichselementes (730) an einer vorgegebenen Position auf dem Röntgenstrahl-Detektor (240, 250) angeordnet ist, wenn der Röntgenstrahl-Detektor (240, 250) und die Röntgenstrahl-Quelle (200) sich relativ zum Vergleichselement (730) bewegen.
20. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet,

daß:

das Rückkopplungssystem (260, 263, 265) bewirkt, daß die Röntgenstrahl-Quelle (200) einen ersten kreisförmigen Weg um eine erste Rotationsachse (40, 404) überquert, welche eine erste Ebene (62) ausbildet; und

die Einrichtung (256) zum Bewegen des Röntgenstrahl-Detektors (240) bewirkt, daß der Röntgenstrahl-Detektor (240, 250) einen zweiten kreisförmigen Weg um eine zweite Rotationsachse (40, 404) überquert, um eine zweite Ebene (64) auszubilden.

21. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Ebene (62) im wesentlichen parallel zur zweiten Ebene (64) ist.
22. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß sich die erste Achse (40, 404), im wesentlichen mit der zweiten Achse (40, 404) deckt.
23. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß der erste kreisförmige Weg und der zweite kreisförmige Weg im wesentlichen die gleiche Rotationsachse (40, 404) aufweisen, wobei die ersten und zweiten Ebenen (62, 64) im wesentlichen parallel sind.
24. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß:

die durchdringende Strahlungsquelle (200) ferner umfaßt:

eine Röntgenstrahl-Quelle (200), wobei Röntgenstrahlen (282) von einer Position auf einem Ziel (287) emittiert werden, auf welches ein Elektronenstrahl (285) auftrifft; und

eine elektrische Steuer- bzw. Lenkeinrichtung (281) zum Ablenken des Elektronenstrahls (285) zu unterschiedlichen Positionen auf dem Ziel (287), wobei die Steuereinrichtung (281) eine Rotation des Elektronenstrahls (285) um eine Achse (40, 404) und das Abfahren eines im wesentlichen kreisförmigen Weges um das Ziel (287) bewirken kann, wodurch ein Röntgenstrahlpunkt (280) sich in einem ersten kreisförmigen Muster bewegt, wobei das erste kreisförmige Muster eine erste Ebene (62) festlegt;

der Strahlungsdetektor (240) ferner umfaßt:

einen Wandlerschirm (250) zum Erzeugen eines optischen Bildes entsprechend einem Röntgenstrahlbild der elektrischen Verbindung (214), welches durch die elektrische Verbindung (214) durchdringende Röntgenstrahlen (282) ausgebildet wird;

eine Einrichtung (256) zum Bewegen des Wandlerschirms (250) derart, daß er um die Achse (40, 404) rotiert und entlang eines im wesentlichen kreisförmigen Weges wandert, welcher ein zweites kreisförmiges Muster festlegt, wobei das zweite kreisförmige Muster eine zweite Ebene (64) definiert, welche im wesentlichen parallel zur ersten Ebene (62) ist;

eine optische Derotationseinrichtung (252, 254, 256) zum Übertragen des optischen Bildes von dem rotierenden Wandlerschirm (250) zu einer stationären optischen Bildebene; und

eine Kamera (258), welche in der stationären optischen Bildebene zum Erfassen des optischen Bildes angeordnet ist, wobei die Kamera (258) einen elektronischen Bildsignalausgang aufweist, der dem optischen Bild entspricht.

25. Vorrichtung nach Anspruch 24, gekennzeichnet durch:

ein Steuersystem (263, 260) zum Synchronisieren der Kreisbewegungen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und des Wandlerschirms (250) derart, daß die optische Bilddarstellung des Röntgenstrahl-Bildes der elektrischen Verbindung (214) auf der stationären Bildebene ausgebildet wird, wobei das Steuersystem umfaßt:

einen Sensor (263), welcher die Position des Wandler-  
schirms (250) entlang des zweiten kreisförmigen Musters  
überwacht und der Position des Wandlerschirmes (250)  
entsprechende Koordinaten überträgt; und

eine Festlegungstabelle (720x, 720y), welche die Koor-  
dinaten von dem Sensor (263) empfängt und entsprechende  
Signale zu der elektrischen Steuereinrichtung (281)  
überträgt, so daß die Bewegung des Röntgenstrahl-Quel-  
len-Punktes (280) mit der Bewegung des Wandlerschirmes  
synchronisiert wird; wobei

das Analysesystem (270, 272) die Querschnittsbilder  
einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214)  
analysieren kann und ferner umfaßt:

eine Bilddigitalisierungseinrichtung (270) zum Empfangen  
der elektronischen Bildsignale von der Kamera (258) und  
zum Ausbilden einer digitalen Bilddarstellung des  
elektronischen Bildsignales, welches dem Röntgenstrahl-  
Bild der elektrischen Verbindung (214) entspricht; und

einen programmgesteuerten Computerbereich (272), welcher  
derart programmiert ist, daß er auf vorgegebene Bereiche  
des digitalen Bildes zugreift und die Bereiche entspre-  
chend einem vorgegebenen Satz von Instruktionen auf spe-  
zielle Merkmale analysiert, welche spezielle Defekte der  
elektrischen Verbindung darstellen.



26. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Röntgenstrahl-Quelle (200) eine steuerbare Elektronenstrahl-Röntgenstrahl-Röhre (200) aufweist.
27. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrischen Steuereinrichtung (281) Spulen (281x, 281y) aufweist, die Magnetfelder erzeugen, welche mit dem Elektronenstrahl (285) zusammenwirken, um ihn abzulenken.
28. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß der Wandlerschirm (250) ein Kadmium-Wolfram-Szintillationsmaterial aufweist.
29. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß das Querschnittsbild einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214) einer Bildebene (60) innerhalb der elektrischen Verbindung (214) entspricht, welche parallel zu den ersten und zweiten Ebenen (62, 64) ist und die Rotationsachse (40, 404) schneidet.
30. Vorrichtung nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildebene (60) der elektrischen Verbindung (214) zwischen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und dem Röntgenstrahl-Detektor (30) derart angeordnet ist, daß der Abstand von der Bildebene (60) zur ersten Ebene (62) kleiner als der Abstand von der Bildebene (60) zur zweiten Ebene (64) ist.
31. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung (256) zum Bewegen des Wandlerschirms (250) ferner einen Drehtisch (256) aufweist, welcher um die Achse (40, 404) rotiert und auf welchem der Wandlerschirm (250) montiert ist.
32. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Derotationseinrichtung (252, 254, 256)

erste und zweite Spiegel (254, 252) umfaßt, die auf dem Drehtisch (256) befestigt sind, wobei die Spiegel (254, 252) mit einem Winkel von ungefähr  $45^\circ$  bezüglich der Rotationsachse (40, 404) und bezüglich der ersten und zweiten Ebenen (62, 64) ausgerichtet sind.

33. Vorrichtung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Spiegel (254) das optische Bild von dem Wandlerschirm (250) empfängt und es zum zweiten Spiegel (252) reflektiert, wobei der zweite Spiegel (252) ferner das Bild zu der stationären optischen Bildebene reflektiert.
34. Vorrichtung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Spiegel (252) die Rotationsachse (40, 404) schneidet.
35. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Kamera (258) eine Schwachlichtniveau-Videokamera (258) aufweist.
36. Vorrichtung nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Schwachlichtniveaukamera (258) einen siliziumverstärkten Zielbildverstärker aufweist.
37. Vorrichtung nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß das Analysesystem (270, 272) eine Vielzahl paralleler Bildprozessoren (272a, 272b, ..., 272n) aufweist.
38. Vorrichtung nach Anspruch 24, gekennzeichnet durch einen Positioniertisch (230) zum Bewegen der Leiterplatte (210).
39. Verfahren zum Prüfen einer elektrischen Verbindung (214) zwischen elektrischen, auf einer Oberfläche einer Leiterplatte (210) befestigten Bauteilen (212), gekennzeichnet durch die Schritte:

Erzeugen eines Querschnittsbildes einer Schnittebene der elektrischen Verbindung (214);

Absuchen des Querschnittsbildes nach einem vorgegebenen Merkmal, welches einen speziellen Defekttyp der elektrischen Verbindung (214) darstellt; und

Analysieren des beim Absuchschritt gefundenen vorgegebenen Merkmals, um die Qualität der elektrischen Verbindung (214) zu bestimmen.

40. Verfahren nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Erzeugen des Querschnittsbildes ferner die Schritte zum Erzeugen von Röntgenstrahlen (282) mit einer Röntgenstrahl-Quelle (200) und Erfassen der Röntgenstrahlen (282) mit einem Röntgenstrahl-Detektor (240) aufweist.
41. Verfahren nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Erzeugen des Querschnittsbildes ferner den Schritt zum Erzeugen eines Röntgenstrahl-Laminographen der elektrischen Verbindung (214) aufweist.
42. Verfahren nach Anspruch 41, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Erzeugen des Röntgenstrahl-Laminographen ferner die Schritte zum Bewegen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und des Röntgenstrahl-Detektors (240) bezüglich der elektrischen Verbindung (214) aufweist.
43. Verfahren nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Erzeugen des Röntgenstrahl-Laminographen ferner die Schritte aufweist:

Bewegen der Röntgenstrahl-Quelle (200) durch eine elektrische Einrichtung;

Bewegen des Röntgenstrahl-Detektors (240) durch eine elektromechanische Einrichtung; und

Synchronisieren der Bewegungen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und des Röntgenstrahl-Detektors (240) mit einem elektrischen Rückkopplungssystem (260, 263, 265).

44. Verfahren nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Analysieren des vorgegebenen Merkmals ferner die Schritte zum Durchführen vorgegebener Tests an dem Querschnittsbild an vorgegebenen Querschnittsbildpositionen aufweist.

45. Verfahren nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Durchführen der vorgegebenen Tests ferner die Schritte umfaßt:

Berechnen einer Reihe von Differenzialbild-Intensitätsgrauwerten ( $\Delta G_{Ti,i+1}$ ) entlang eines Randes (1380), welcher die elektrischen Verbindung (214) umgibt; und

Vergleichen der Differenzialbild-Intensitätsgrauwerte ( $\Delta G_{Ti,i+1}$ ) mit einem vorgegebenen Schwellengrauwert ( $\Delta G_{Th}$ ).

46. Verfahren nach Anspruch 45, gekennzeichnet durch die Schritte Identifizieren von Positionen entlang des Randes (1380), wobei die berechnenden Differenzialbild-Intensitätsgrauwerte ( $\Delta G_{Ti,i+1}$ ) den vorgegebenen Schwellengrauwert ( $\Delta G_{Th}$ ) übersteigen, und Kennzeichnen der Positionen der Lötmittelüberbrückungsdefekte.

47. Verfahren nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Durchführen der vorgegebenen Tests ferner die Schritte umfaßt:

Bestimmen von drei Bereichen (1601, 1602, 1603) des

Querschnittsbildes entsprechend den drei unterschiedlichen Bereichen (1501, 1502, 1503) der elektrischen Verbindung (214);

Berechnen einer Durchschnittsbildintensität ( $I_P$ ,  $I_H$ ,  $I_T$ ) für jeden der drei Bereiche (1601, 1602, 1603); und

Vergleichen der Durchschnittsbildintensitäten ( $I_P$ ,  $I_H$ ,  $I_T$ ) mit einem ersten und einem zweiten Satz von vorgegebenen Schwellenwerten ( $Th_{I,P}$ ,  $Th_{I,H}$ ,  $Th_{I,T}$ ;  $Th_{M,P}$ ,  $Th_{M,H}$ ,  $Th_{M,T}$ ).

48. Verfahren nach Anspruch 47, gekennzeichnet durch die Schritte:

Identifizieren von Positionen, an welchen die Durchschnittsbildintensitäten ( $I_P$ ,  $I_H$ ,  $I_T$ ) kleiner als sowohl der erste als auch der zweite Satz von Schwellenwerten sind ( $Th_{I,P}$ ,  $Th_{I,H}$ ,  $Th_{I,T}$ ;  $Th_{M,P}$ ,  $Th_{M,H}$ ,  $Th_{M,T}$ ); und

Bezeichnen der Positionen als Defekte aufgrund von fehlendem Lötmittel.

49. Verfahren nach Anspruch 47, gekennzeichnet durch die Schritte:

Identifizieren von Positionen, an welchen Durchschnittsbildintensitäten ( $I_P$ ,  $I_H$ ,  $I_T$ ) kleiner als der erste Satz von Schwellenwerten ( $Th_{I,P}$ ,  $Th_{I,H}$ ,  $Th_{I,T}$ ) und größer als der zweite Satz von Schwellenwerten ( $Th_{M,P}$ ,  $Th_{M,H}$ ,  $Th_{M,T}$ ) sind; und

Bezeichnen der Positionen als Defekte aufgrund von zu wenig Lötmittel.

50. Verfahren nach Anspruch 43, dadurch gekennzeichnet, daß die Röntgenstrahlen (282) durch einen auf ein Ziel (287)



auftreffenden Elektronenstrahl (285) erzeugt werden.

51. Verfahren nach Anspruch 50, gekennzeichnet durch den Schritt Richten des Elektronenstrahls (285) auf unterschiedliche Bereiche des Ziels (287), so daß eine Position (280) bewegt wird, wobei die Röntgenstrahlen (282) durch die Röntgenstrahl-Quelle (200) erzeugt werden.
52. Verfahren nach Anspruch 51, gekennzeichnet durch die Schritte Positionieren eines Vergleichselementes (730) zwischen der Röntgenstrahl-Quelle (200) und dem Röntgenstrahl-Detektor (240) derart, daß das Vergleichselement (730) ein Bild auf dem Röntgenstrahl-Detektor (240) ausbildet.
53. Verfahren nach Anspruch 52, gekennzeichnet durch die Schritte Antreiben des Rückkopplungssystems (260, 263, 265) in Abhängigkeit von der Bewegung des Detektors (240) derart, daß das Bild des Vergleichselementes (730) an einer vorgegebenen Position auf dem Röntgenstrahl-Detektor (240) positioniert wird, wenn der Röntgenstrahl-Detektor (240) und die Position (280) der Röntgenstrahl-Erzeugung sich relativ zum Vergleichselement (730) bewegen.
54. Verfahren nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt zum Analysieren des vorgegebenen Merkmals ferner die Schritte aufweist:

Festlegen eines ersten Fensters (1601), eines zweiten Fensters (1602) und eines dritten Fensters (1603) innerhalb des Querschnittsbildes der elektrischen Verbindung (214), wobei das erste Fenster (1601) einem ersten Bereich (1501) der elektrischen Verbindung (214), das zweite Fenster (1602) einem zweiten Bereich (1502) der elektrischen Verbindung (214) und das dritte Fenster (1603) einem dritten Bereich (1503) der elektrischen

Verbindung (214) entspricht; und

Berechnen einer ersten Durchschnittsbildintensität ( $I_p$ ) entsprechend dem ersten Fenster (1601), einer zweiten Durchschnittsbildintensität ( $I_H$ ) entsprechend dem zweiten Fenster (1602) und einer dritten Durchschnittsbildintensität ( $I_T$ ) entsprechend dem dritten Fenster (1603).

55. Verfahren nach Anspruch 54, gekennzeichnet durch die Schritte:

Festlegen eines ersten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,p}$ ) entsprechend dem ersten Bereich (1501) der elektrischen Verbindung (214), eines zweiten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,H}$ ) entsprechend dem zweiten Bereich (1502) der elektrischen Verbindung (214) und eines dritten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,T}$ ) entsprechend dem dritten Bereich (1503) der elektrischen Verbindung (214); und

Vergleichen der ersten Durchschnittsbildintensität ( $I_p$ ) mit dem ersten vorgegebenen Schwellenwert ( $Th_{M,p}$ ), der zweiten Durchschnittsbildintensität ( $I_H$ ) mit dem zweiten vorgegebenen Schwellenwert ( $Th_{M,H}$ ) und der dritten Durchschnittsbildintensität ( $I_T$ ) mit dem dritten vorgegebenen Schwellenwert ( $Th_{M,T}$ ).

56. Verfahren nach Anspruch 55, dadurch gekennzeichnet, daß der Vergleichsschritt ferner den Schritt zum Berechnen einer ersten Durchschnittsdicke ( $T_p$ ) entsprechend der ersten Durchschnittsbildintensität ( $I_p$ ), einer zweiten Durchschnittsdicke ( $T_H$ ) entsprechend der zweiten Durchschnittsbildintensität ( $I_H$ ) und der dritten Durchschnittsdicke ( $T_T$ ) entsprechend der dritten Durchschnittsbildintensität ( $I_T$ ) aufweist.

57. Verfahren nach Anspruch 56, gekennzeichnet durch den

Schritt Identifizieren von Positionen, an welchen die erste Durchschnittsdicke ( $T_p$ ) kleiner als der erste Schwellenwert ( $Th_{M,p}$ ) und die zweite Durchschnittsdicke ( $T_H$ ) kleiner als der zweite Schwellenwert ( $Th_{M,H}$ ) und die dritte Durchschnittsdicke ( $T_T$ ) kleiner als der dritte Schwellenwert ( $Th_{M,T}$ ) ist, als Defekt (1360f) aufgrund von fehlendem Lötmedium.

58. Verfahren nach Anspruch 55, gekennzeichnet durch:

Bestimmen eines vierten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,p}$ ) entsprechend dem ersten Bereich (1501) der elektrischen Verbindung (214), eines fünften vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,H}$ ) entsprechend dem zweiten Bereich (1502) der elektrischen Verbindung (214) und eines sechsten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,T}$ ) entsprechend dem dritten Bereich (1503) der elektrischen Verbindung (214); und

Vergleichen der ersten Durchschnittsbildintensität ( $I_p$ ) mit den ersten und vierten vorgegebenen Schwellenwerten ( $Th_{M,p}$   $Th_{I,p}$ ), der zweiten Durchschnittsbildintensität ( $I_H$ ) mit den zweiten und fünften vorgegebenen Schwellenwerten ( $Th_{M,H}$   $Th_{I,H}$ ) und der dritten Durchschnittsbildintensität ( $I_T$ ) mit den dritten und sechsten vorgegebenen Schwellenwerten ( $Th_{M,T}$   $Th_{I,T}$ ).

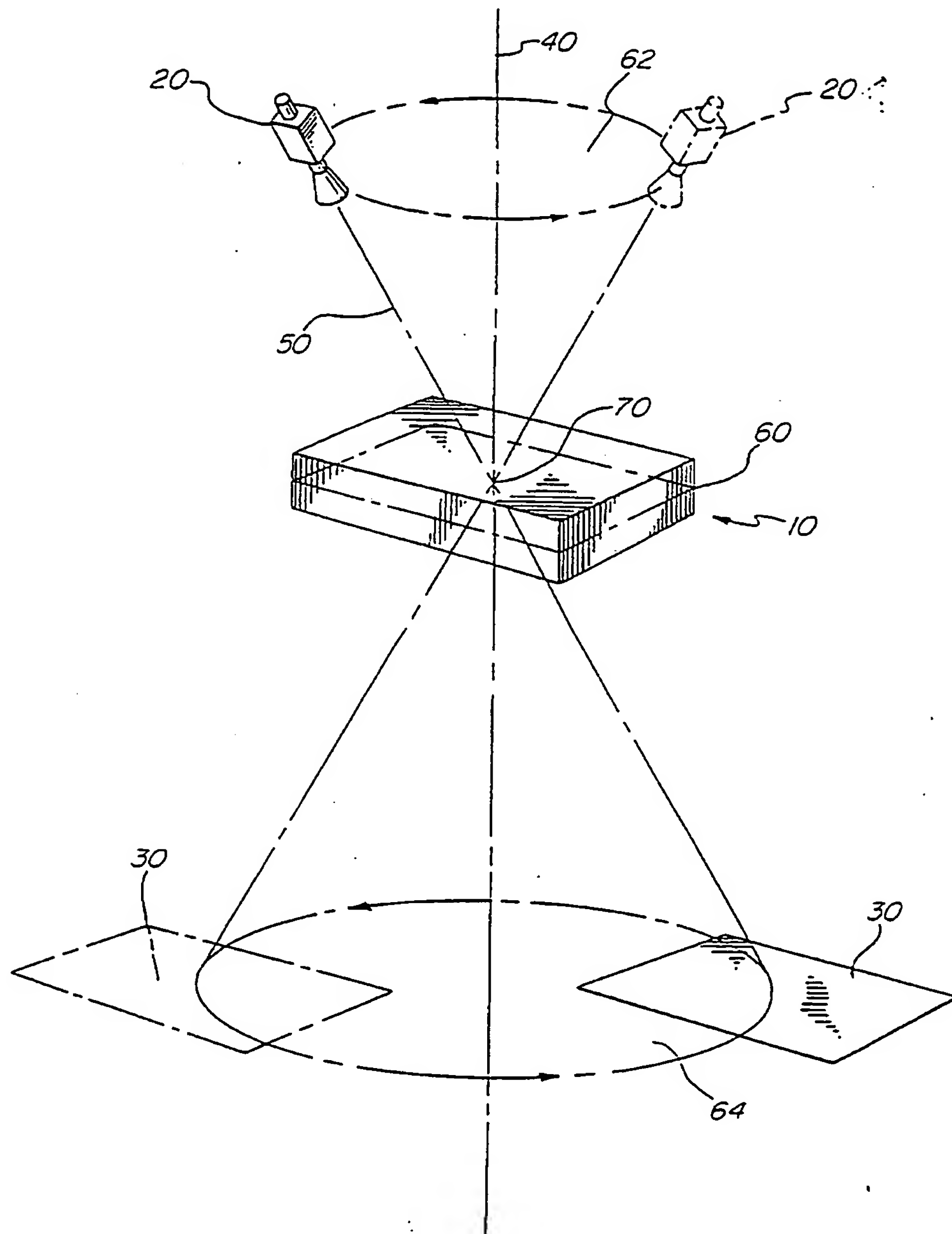
59. Verfahren nach Anspruch 56, gekennzeichnet durch die Schritte:

Bestimmen eines vierten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,p}$ ) entsprechend dem ersten Bereich (1501) der elektrischen Verbindung (214), eines fünften vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,H}$ ) entsprechend dem zweiten Bereich (1502) der elektrischen Verbindung (214) und eines sechsten vorgegebenen Schwellenwertes ( $Th_{I,T}$ ) entsprechend dem dritten Bereich (1503) der elektrischen

Verbindung (214); und

Identifizieren von Positionen, an welchen die erste Durchschnittsdicke ( $T_p$ ) kleiner als der vierte Schwellenwert ( $Th_{I,p}$ ) und größer als der erste Schwellenwert ( $Th_{M,p}$ ), die zweite Durchschnittsdicke ( $T_H$ ) kleiner als der fünfte Schwellenwert ( $Th_{I,H}$ ) und größer als der zweite Schwellenwert ( $Th_{M,H}$ ) und die dritte Durchschnittsdicke ( $T_T$ ) kleiner als der sechste Schwellenwert ( $Th_{I,T}$ ) und größer als der dritte Schwellenwert ( $Th_{M,T}$ ) ist, als ein Defekt (1360c) aufgrund von zu wenig Löt-  
mittel.

FIG. 1





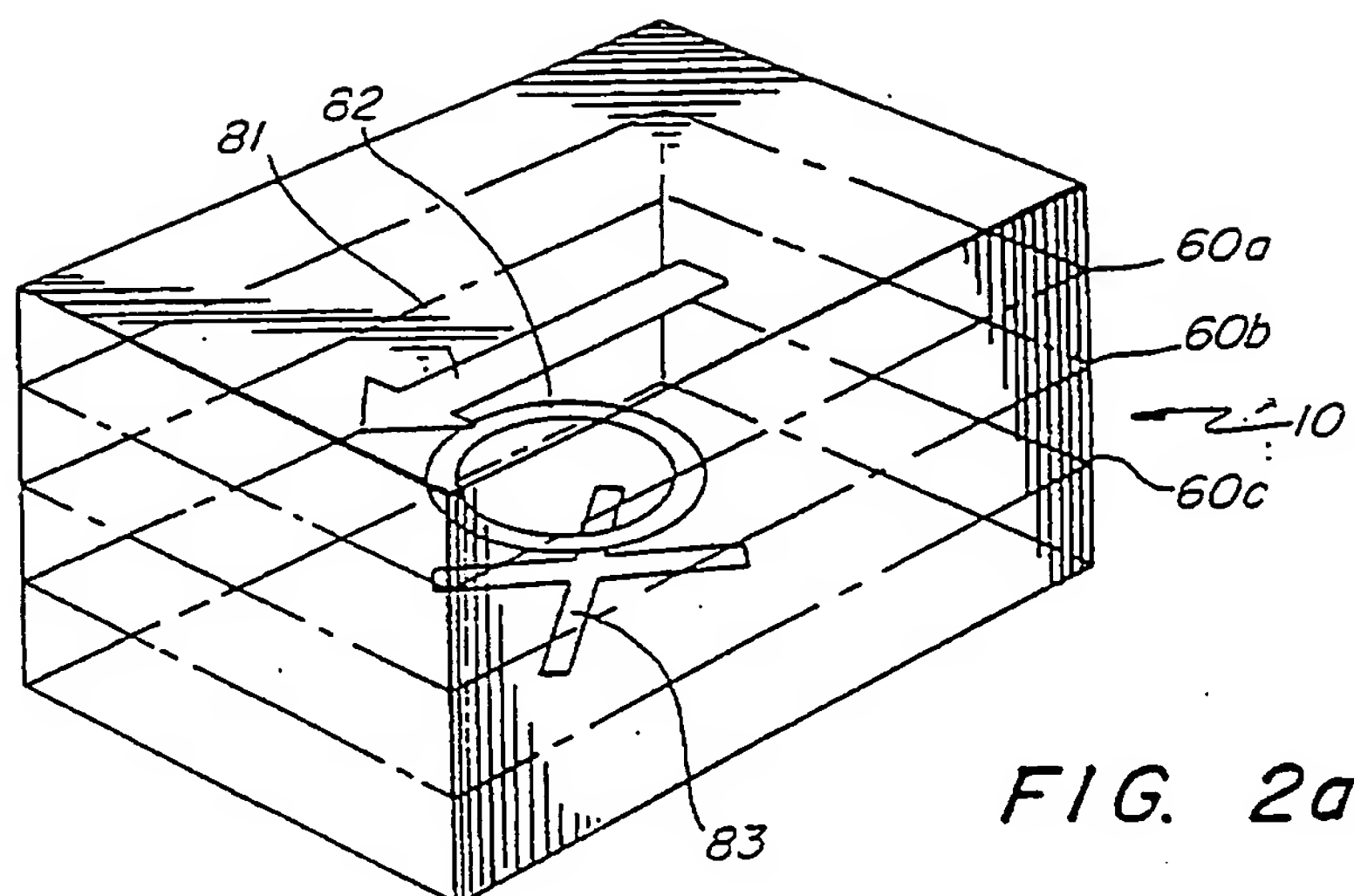


FIG. 2a

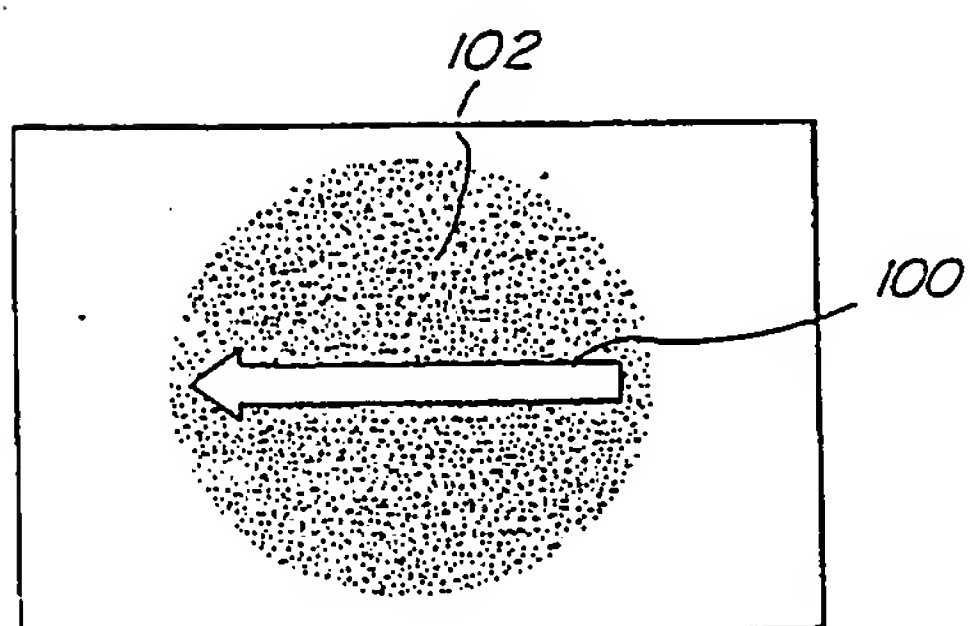


FIG. 2b

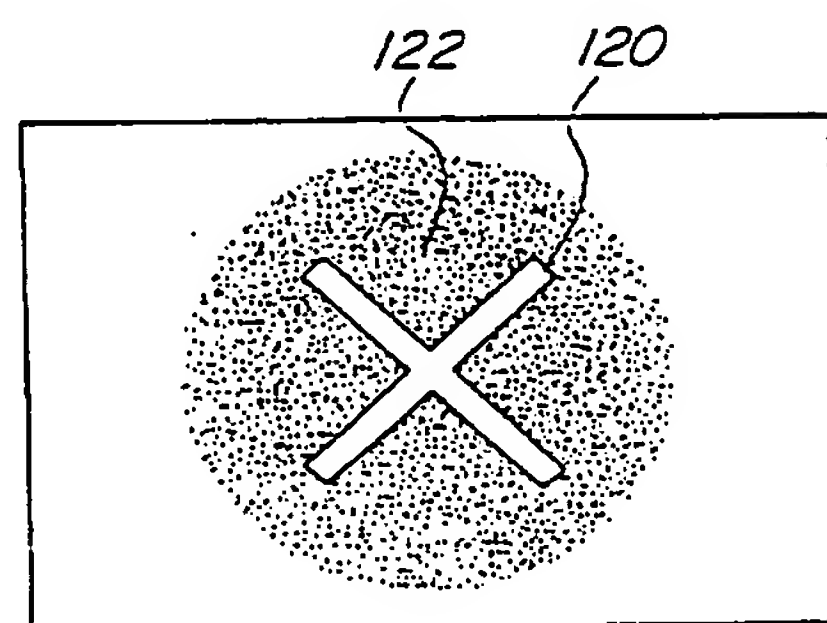


FIG. 2d

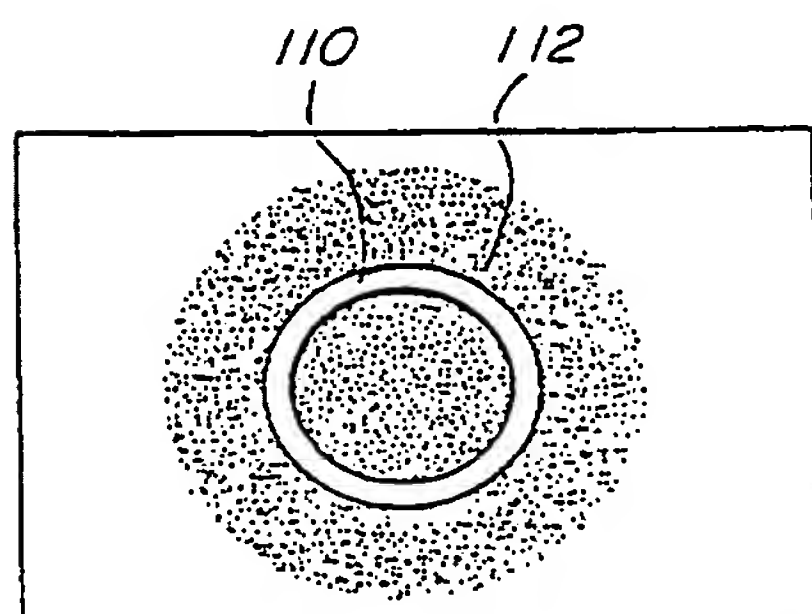


FIG. 2c

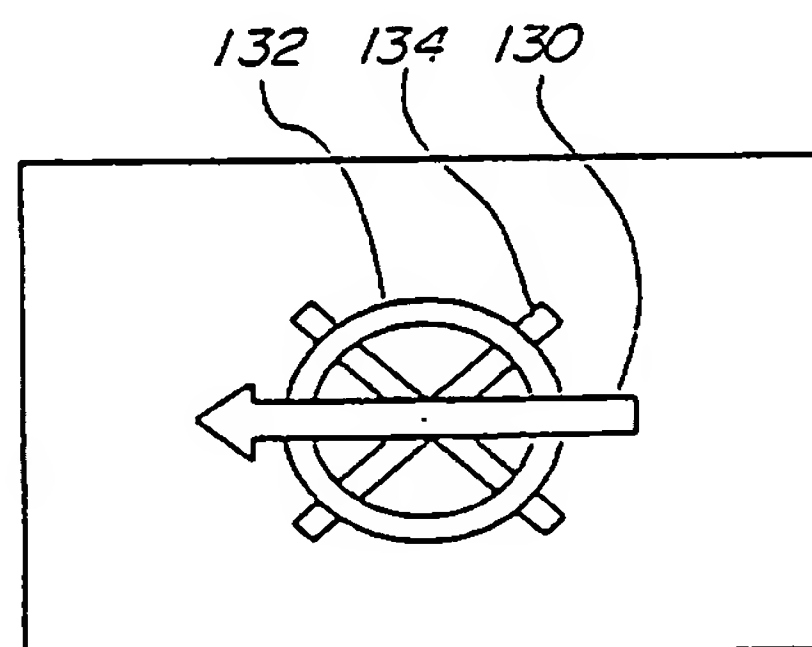
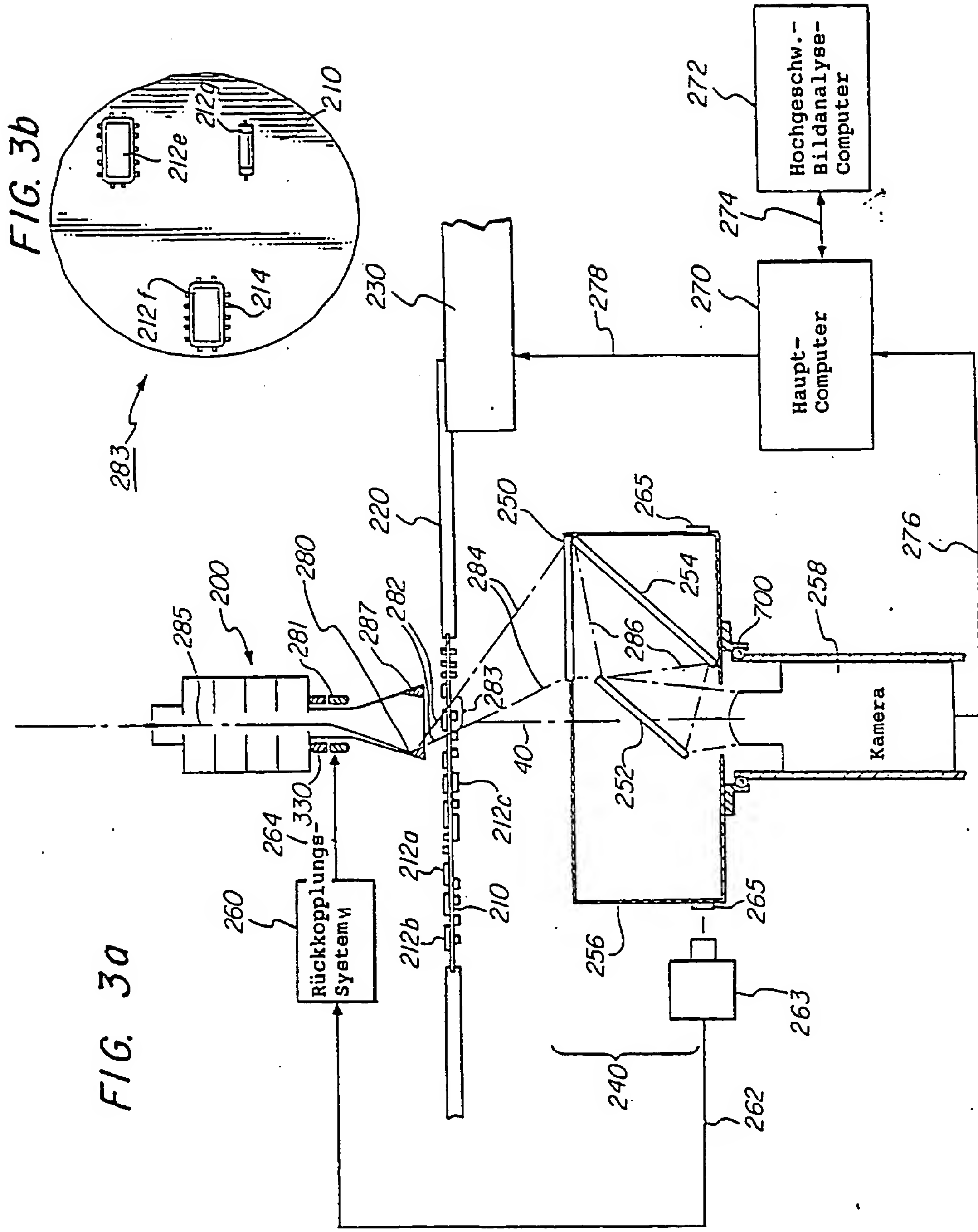


FIG. 2e



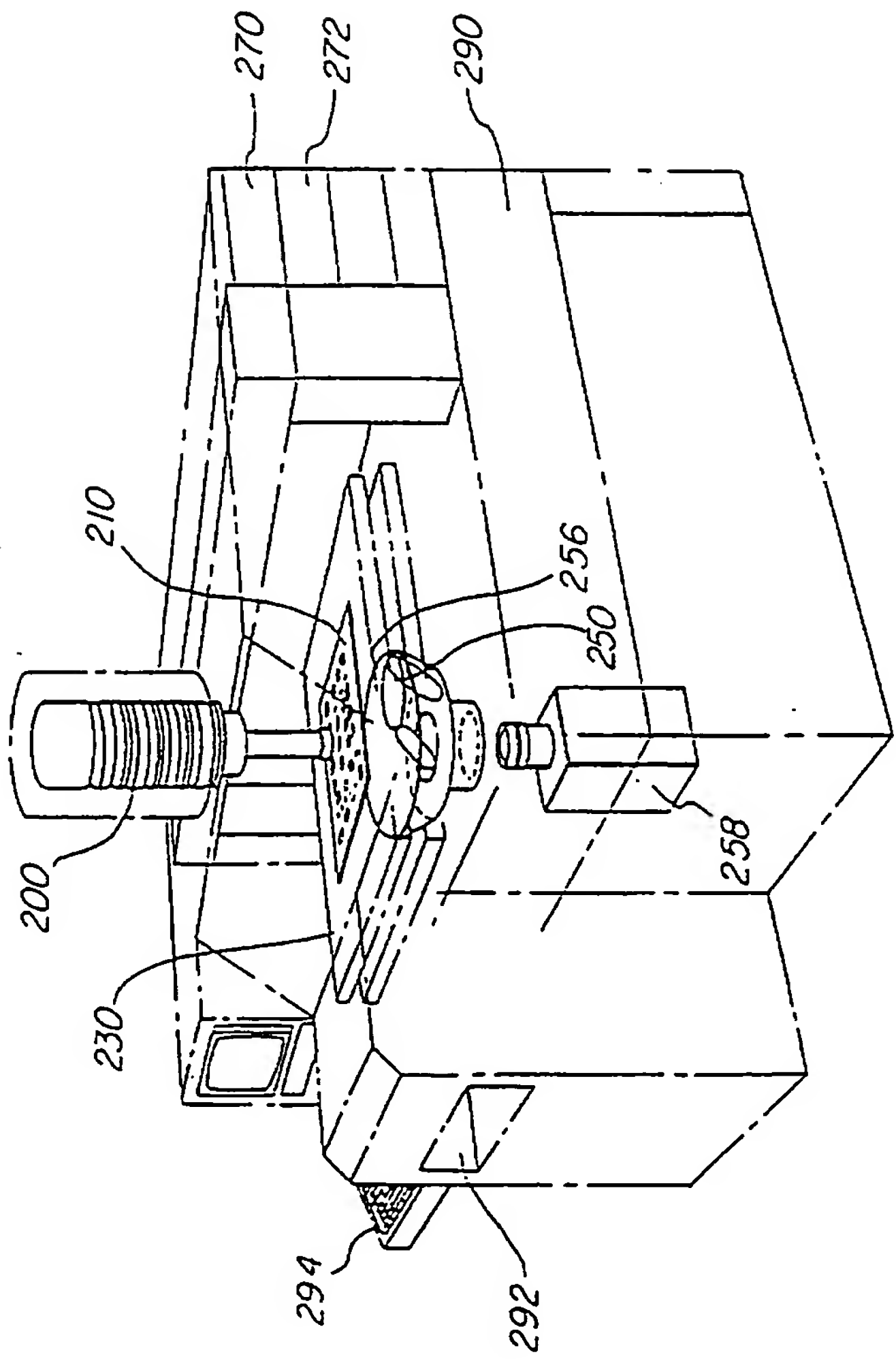


FIG. 3C

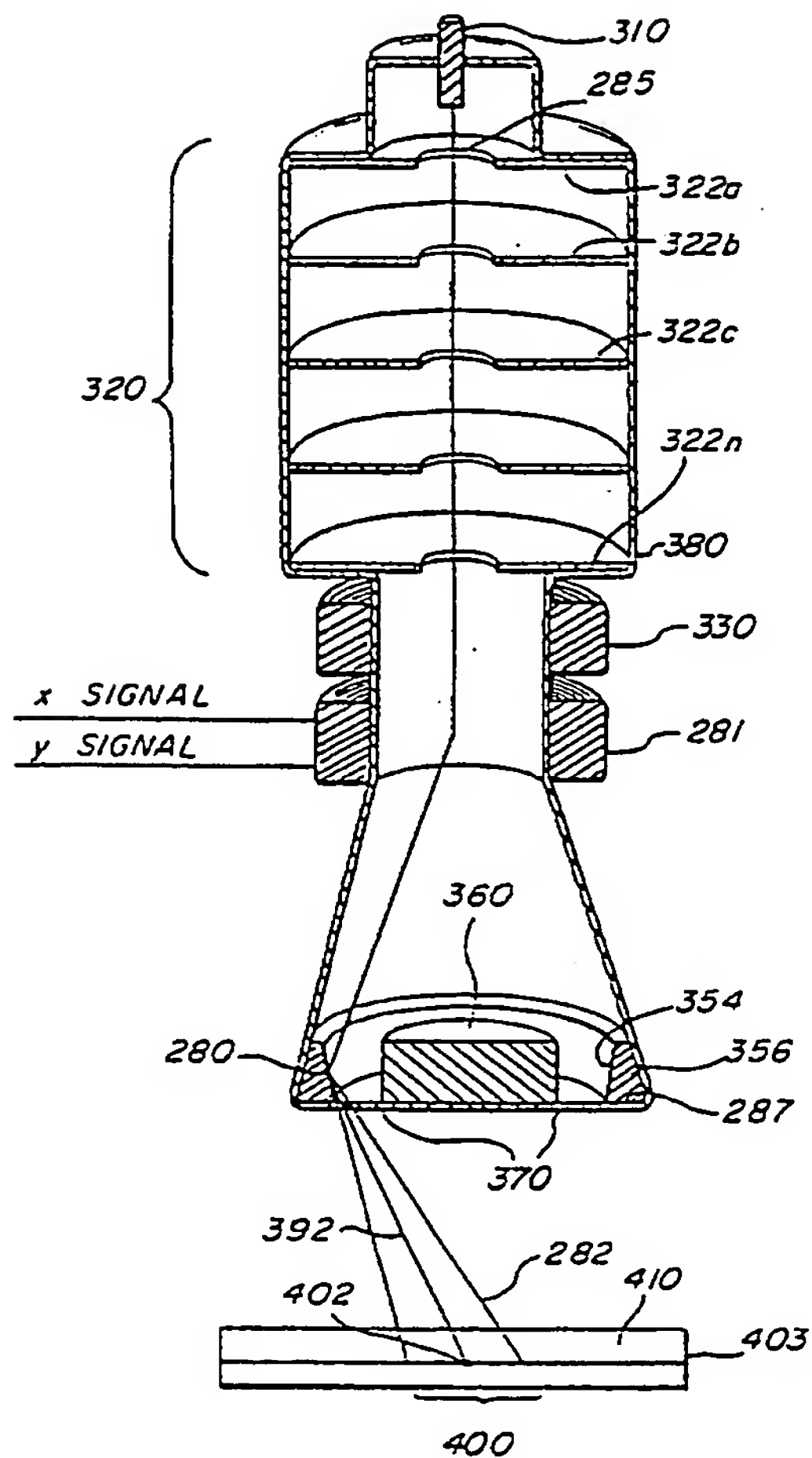


FIG. 4

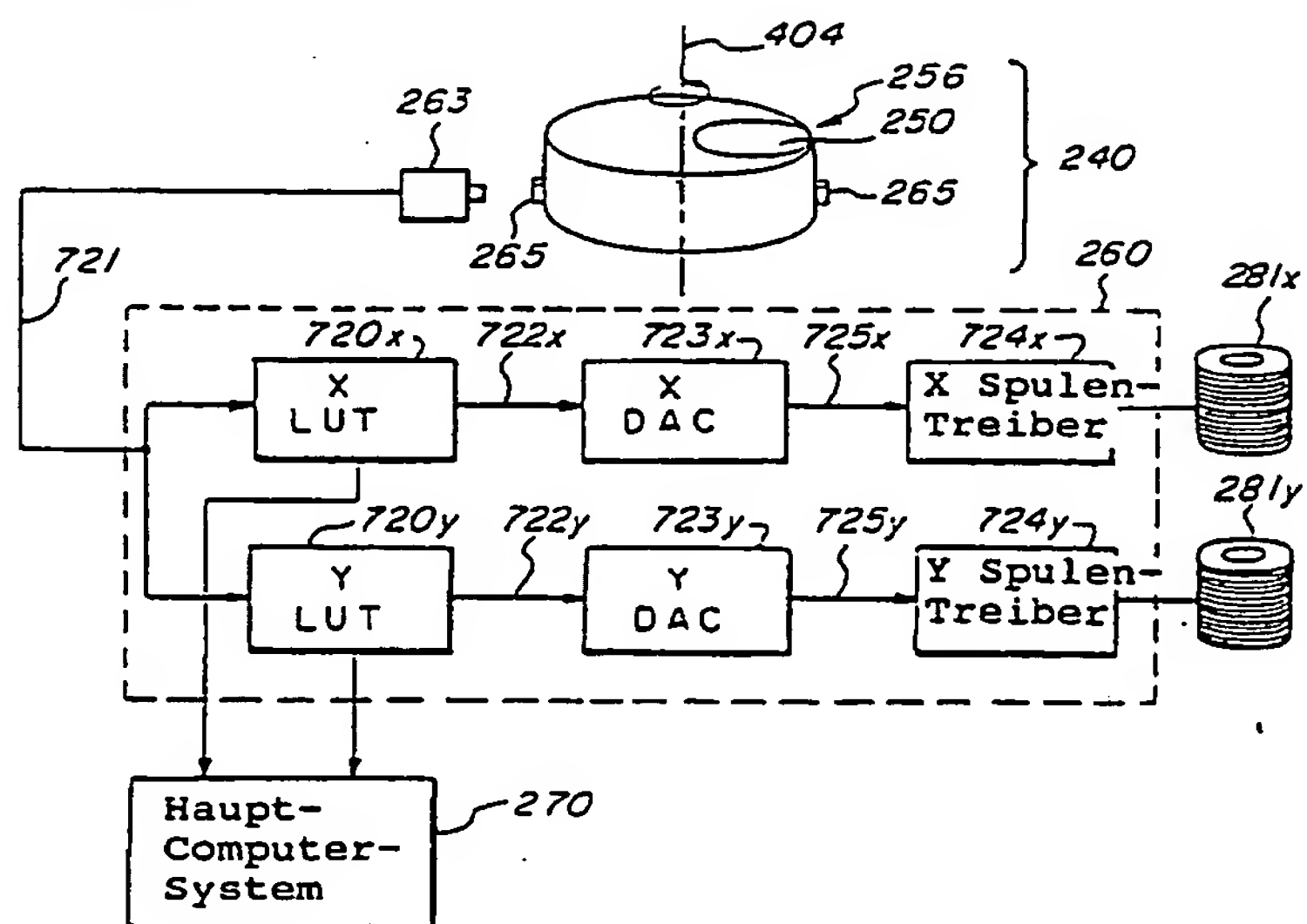


FIG. 8

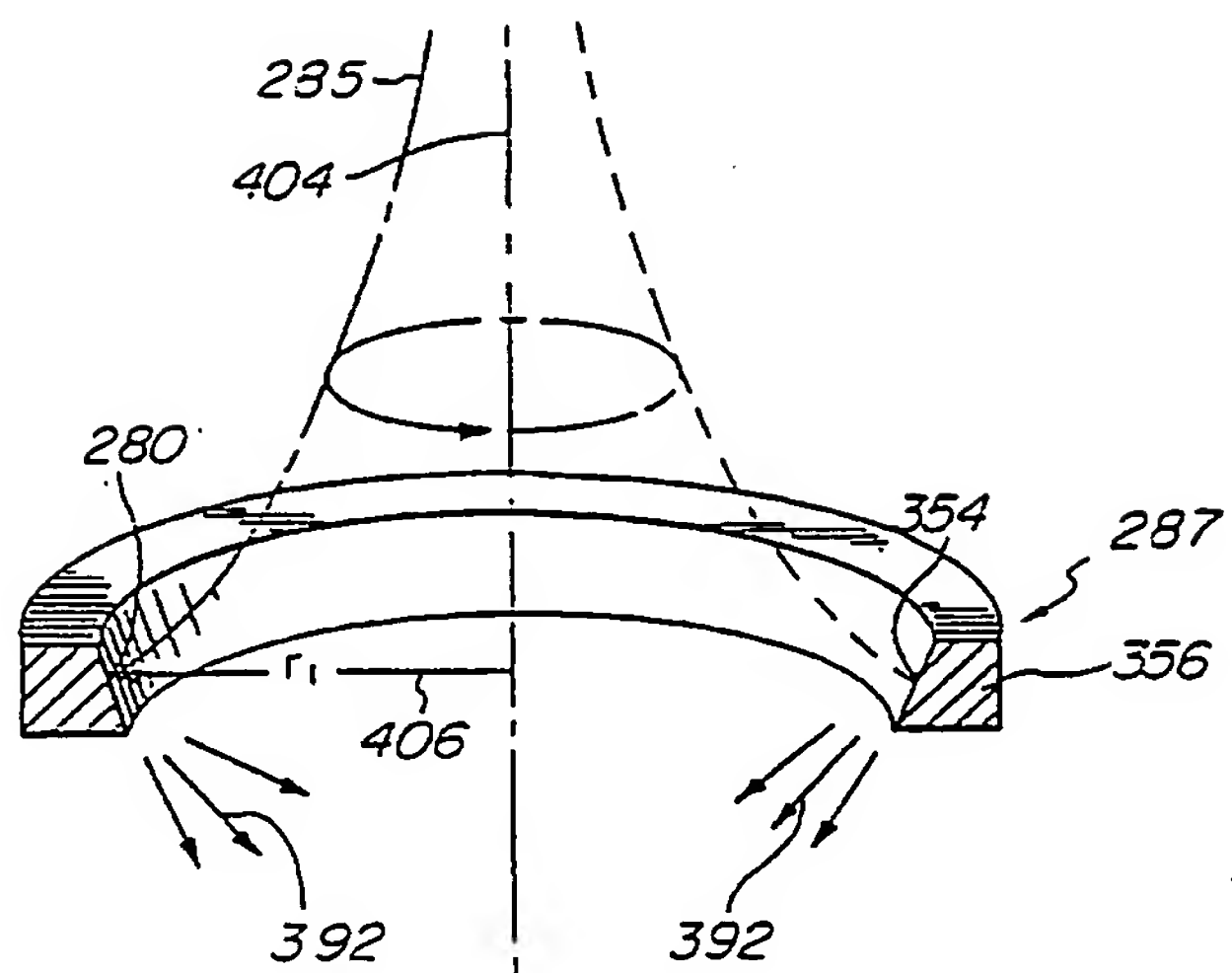


FIG. 5

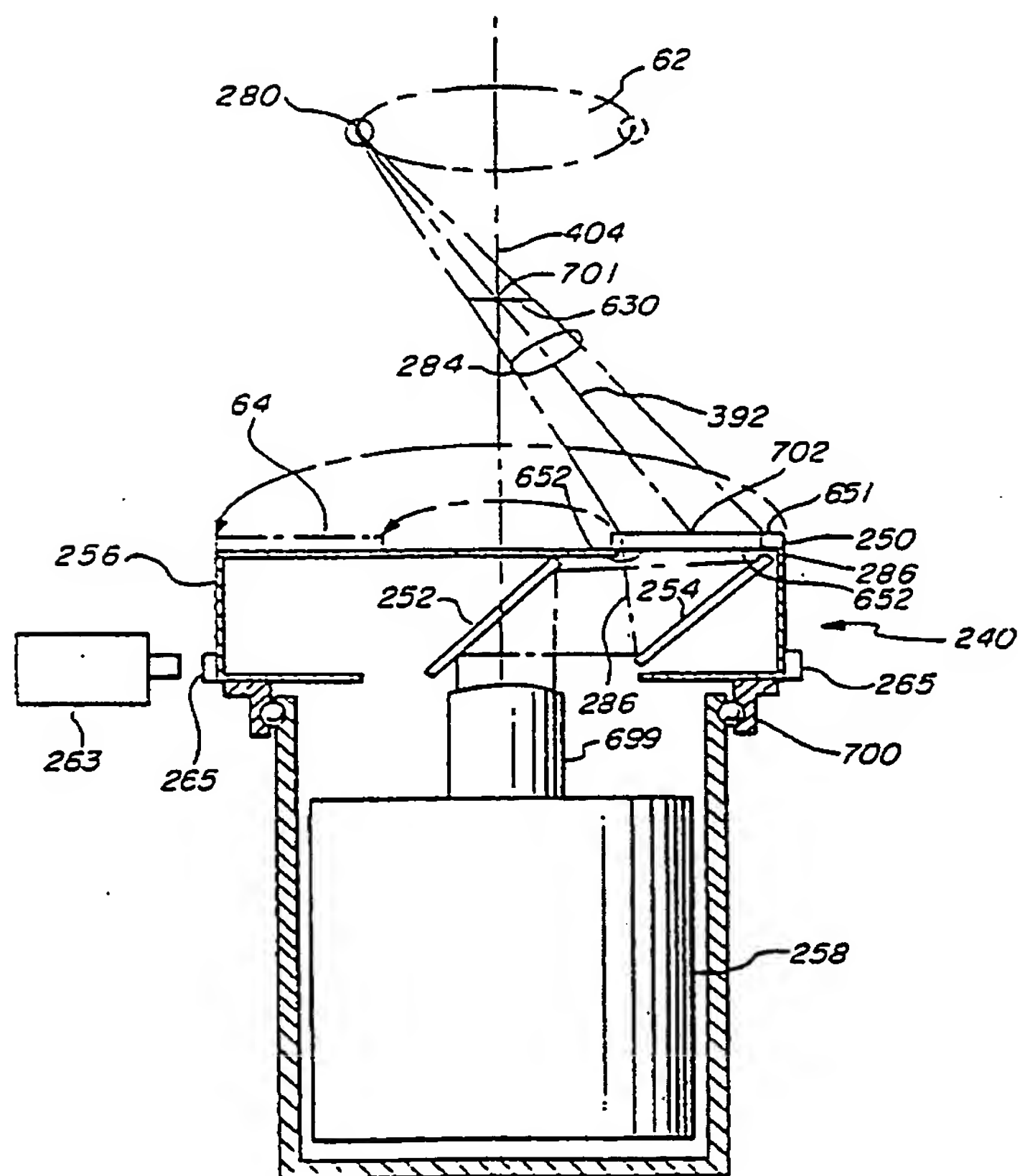


FIG. 6





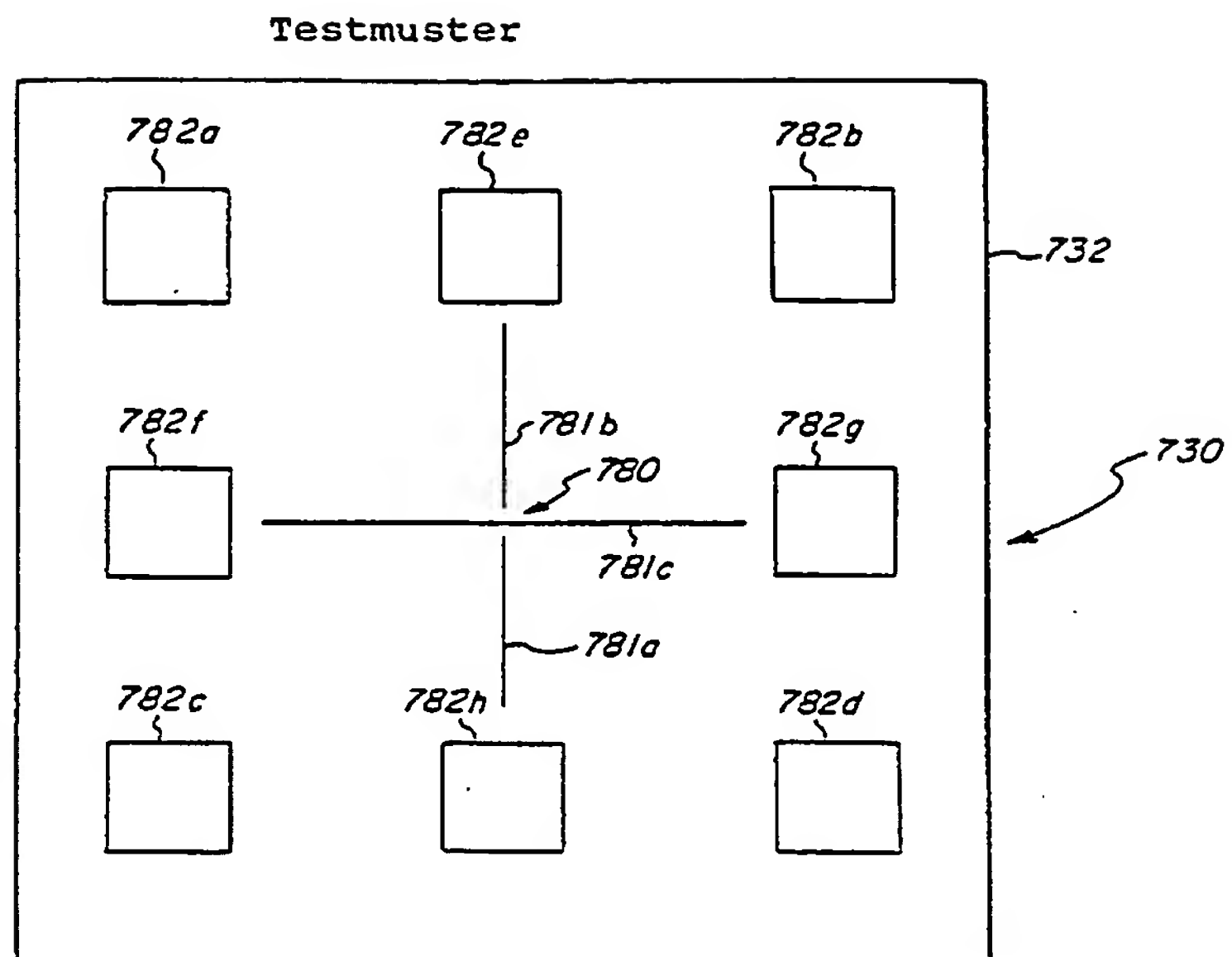


FIG. 9a

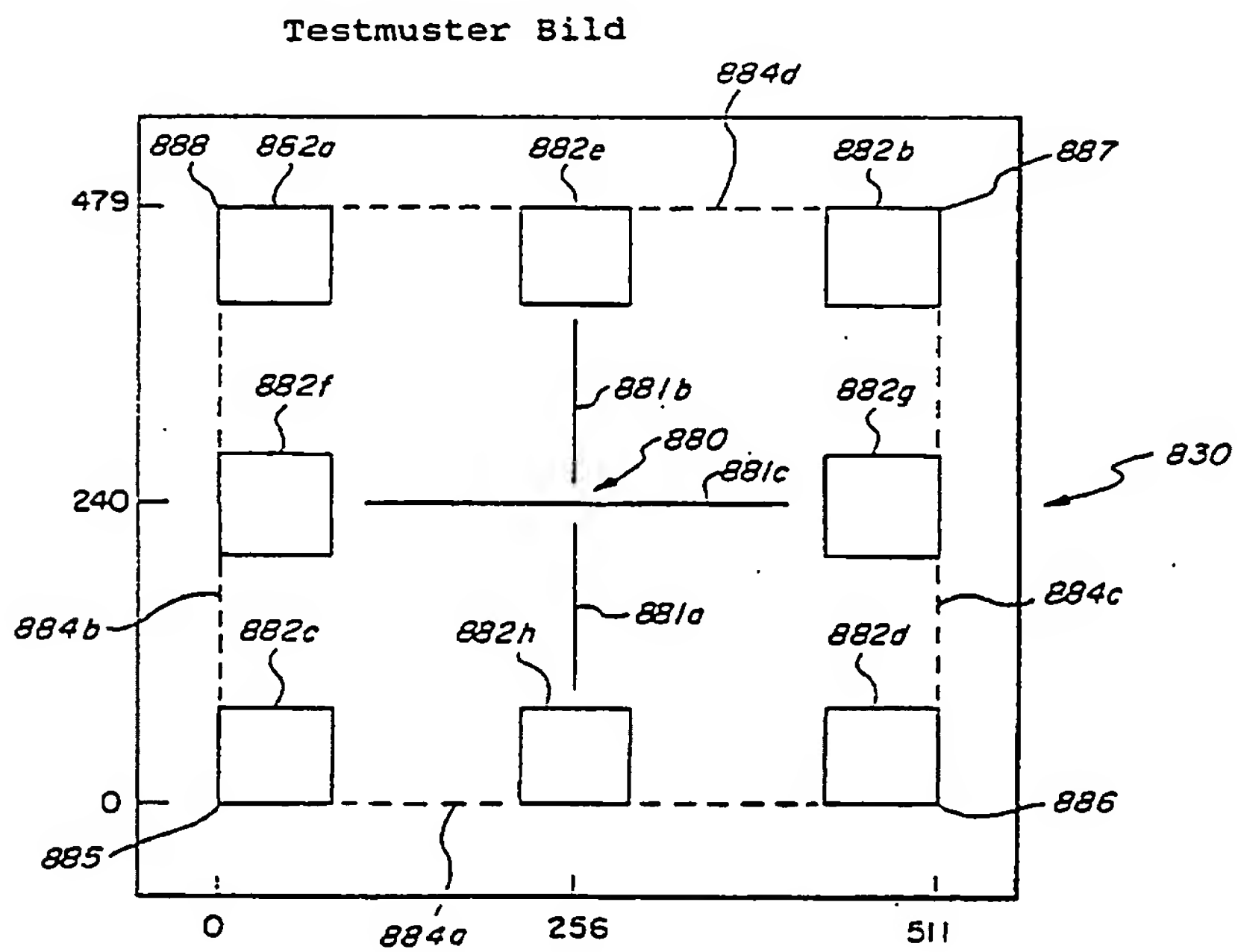


FIG. 9b

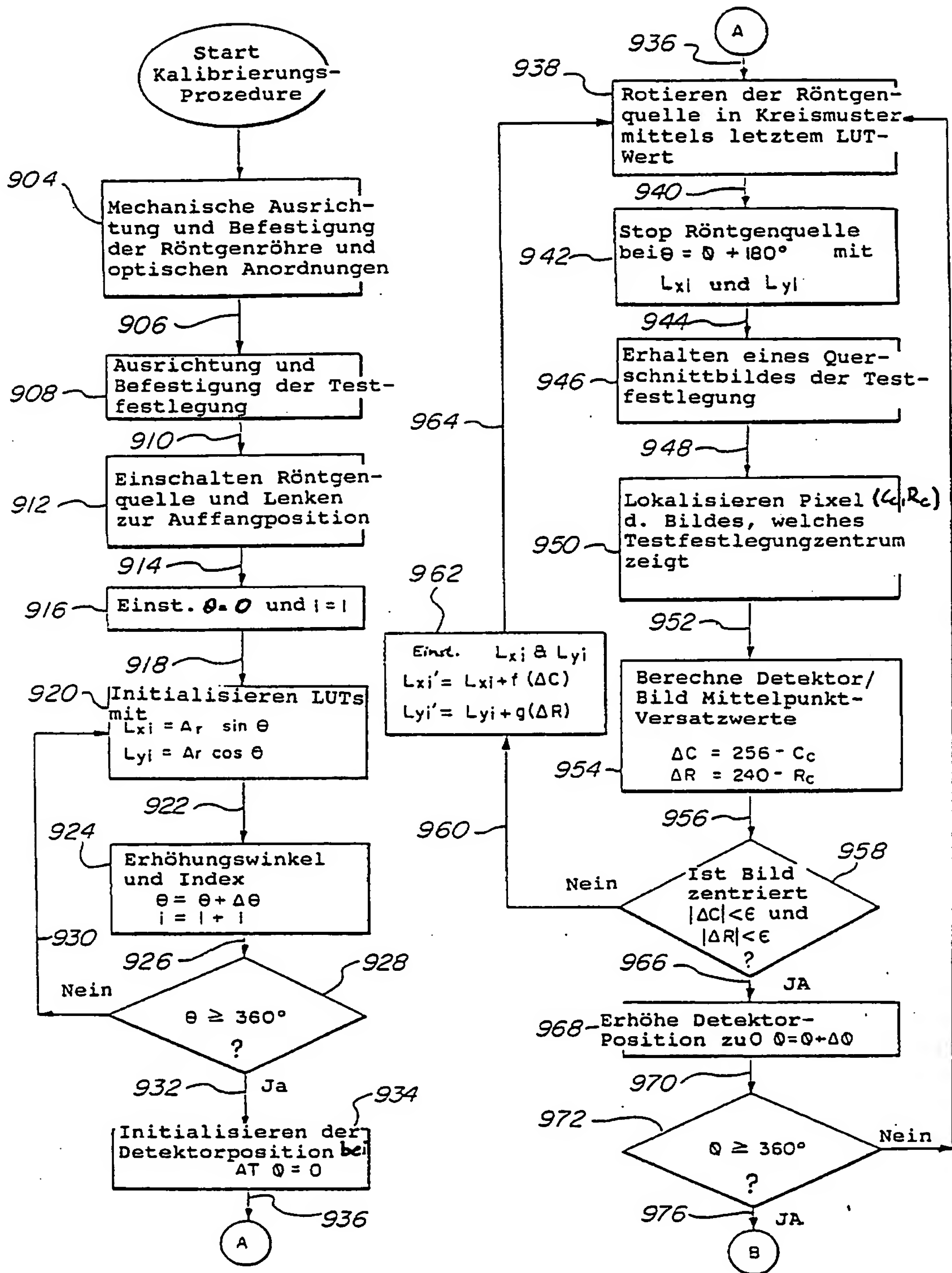


FIG. 10a

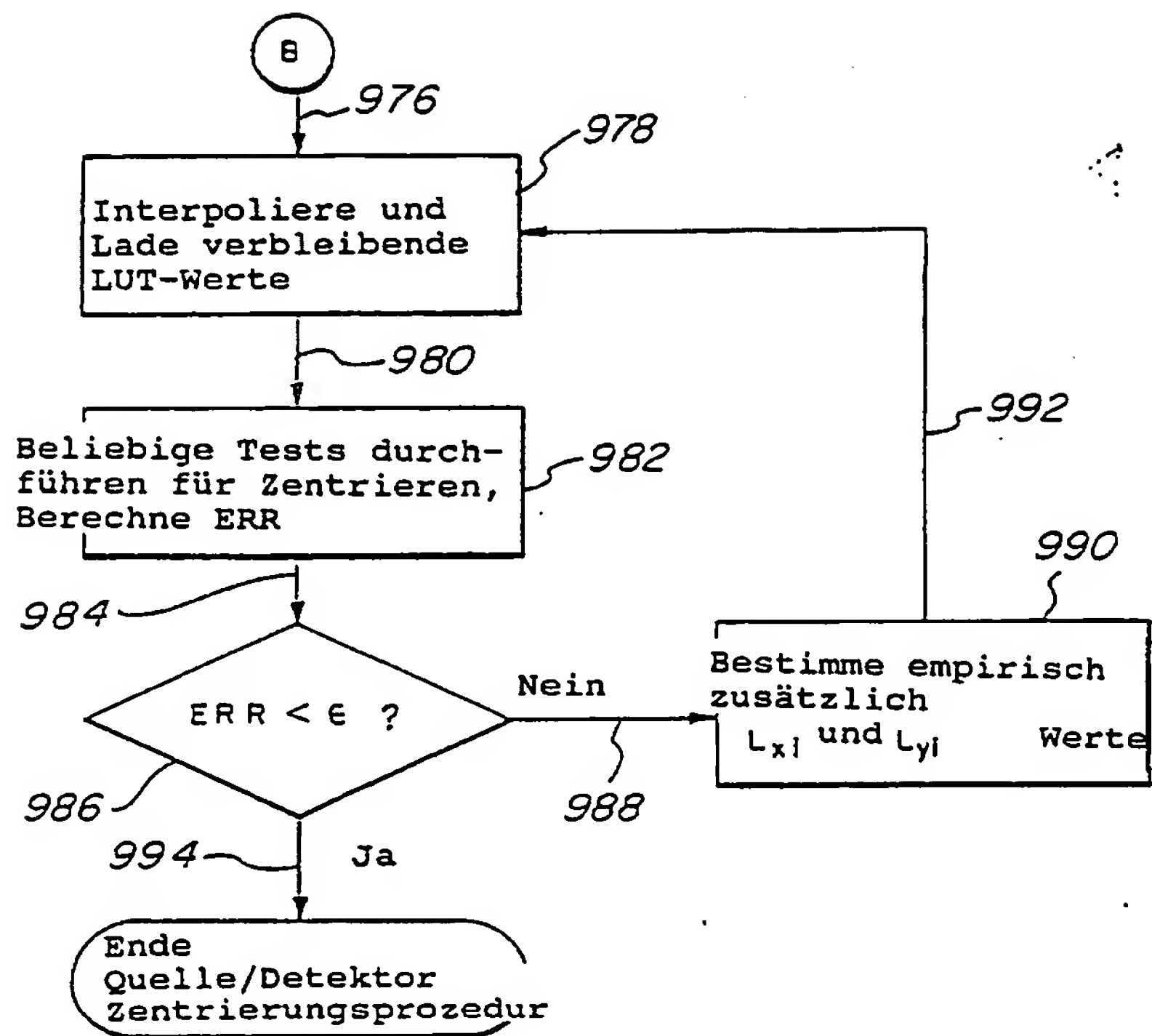


FIG. 10b

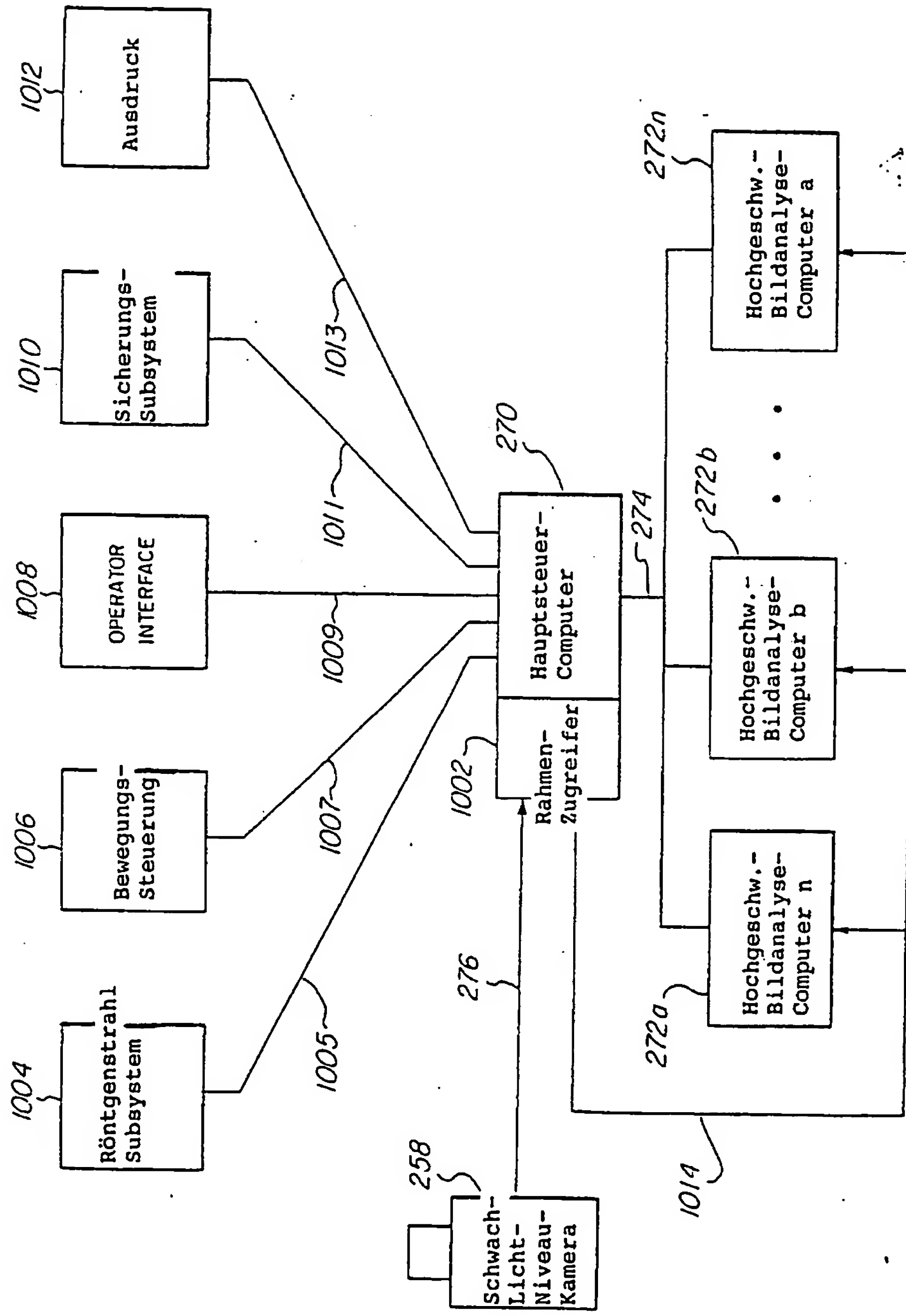
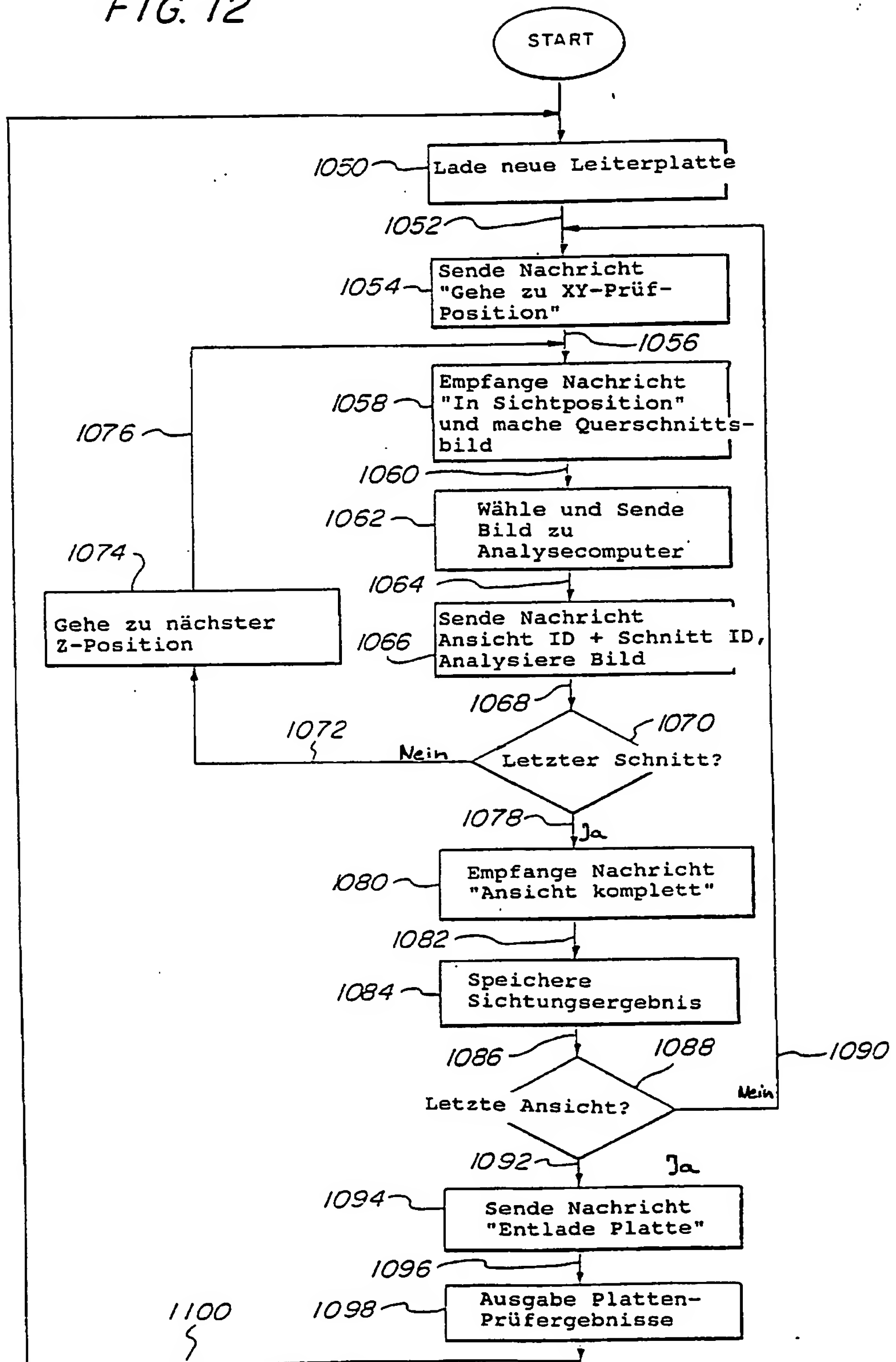


FIG. 11



FIG. 12



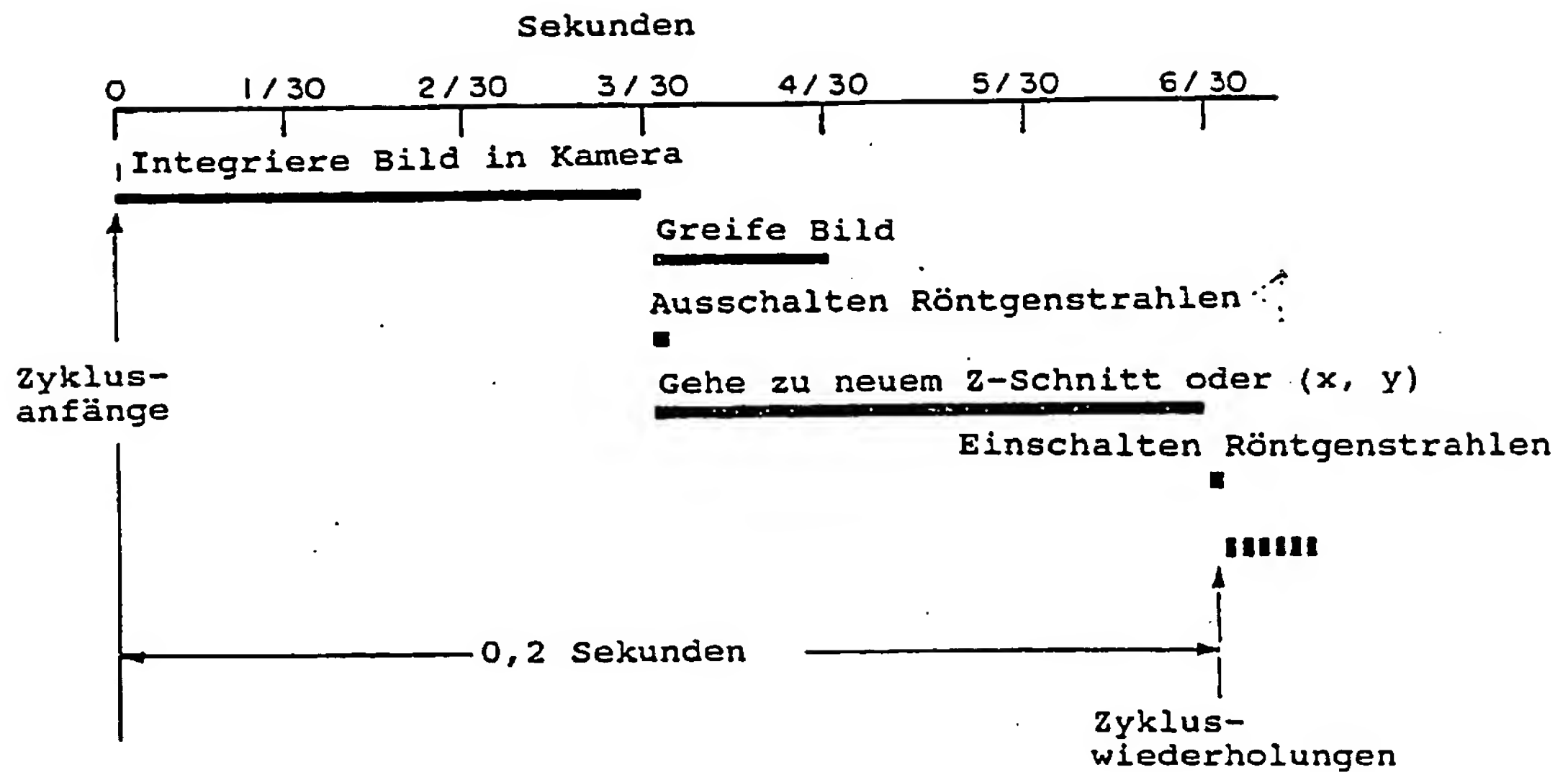


FIG. 13

1102

2/17/88      3DX.001  
11:07

Prüfbericht

Steuereinr. Module P/N 36-772

S/N: A-36-37118-112-SP

1108

1104

1106

1110

1112

FIG. 14

Vorrichtung	Pin	Defekt
U13	2, 3	Überbrückung
U13	5	Vertrocknung, Element
U13	14	Vertrocknung, Blei
R2	1	Riß
R17	1	Nicht ausreichend
R18		Fehlende Komponente
U59		fehlerhaft
U62	49	Ausgerichtet
		angehobener Pin

FIG. 15

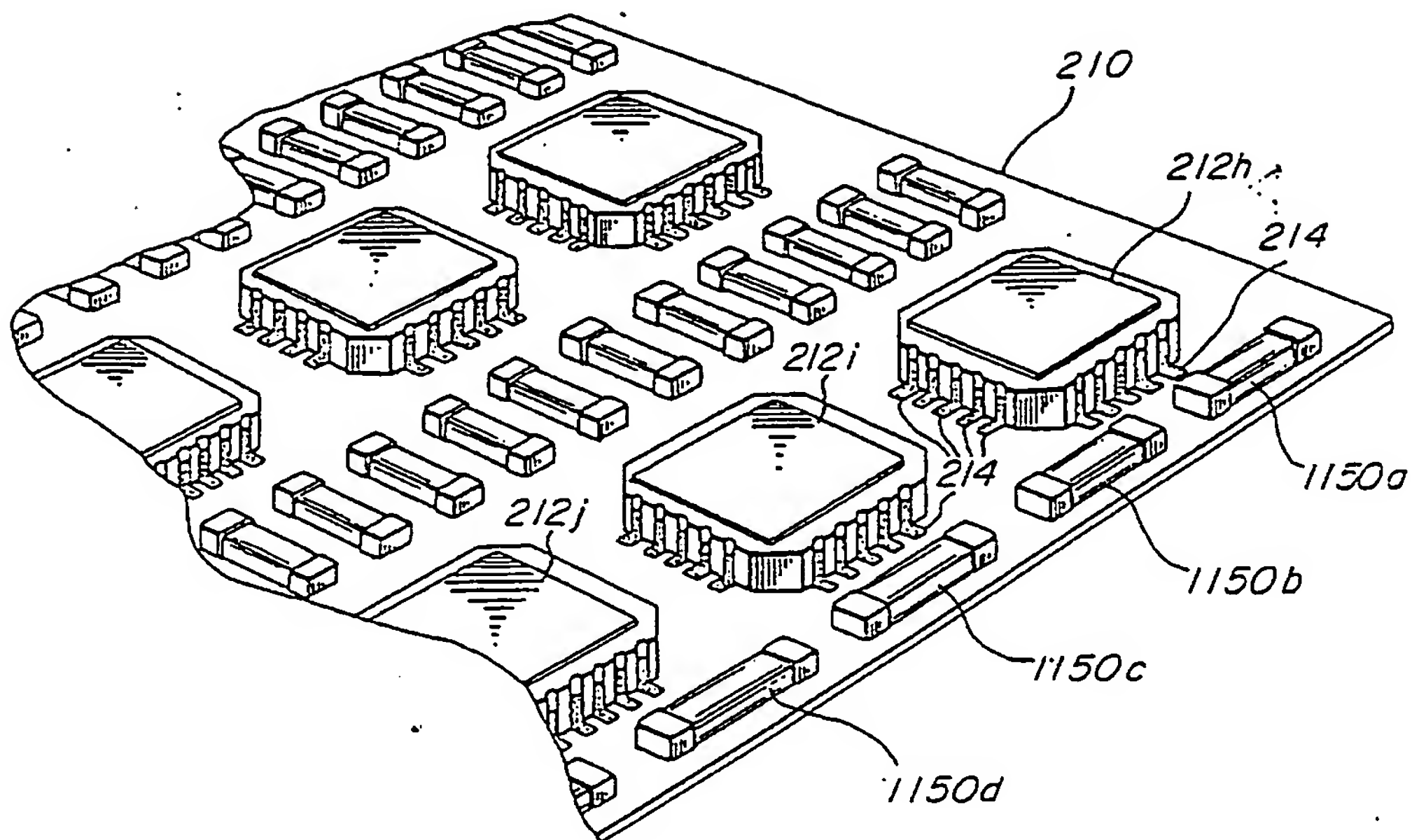
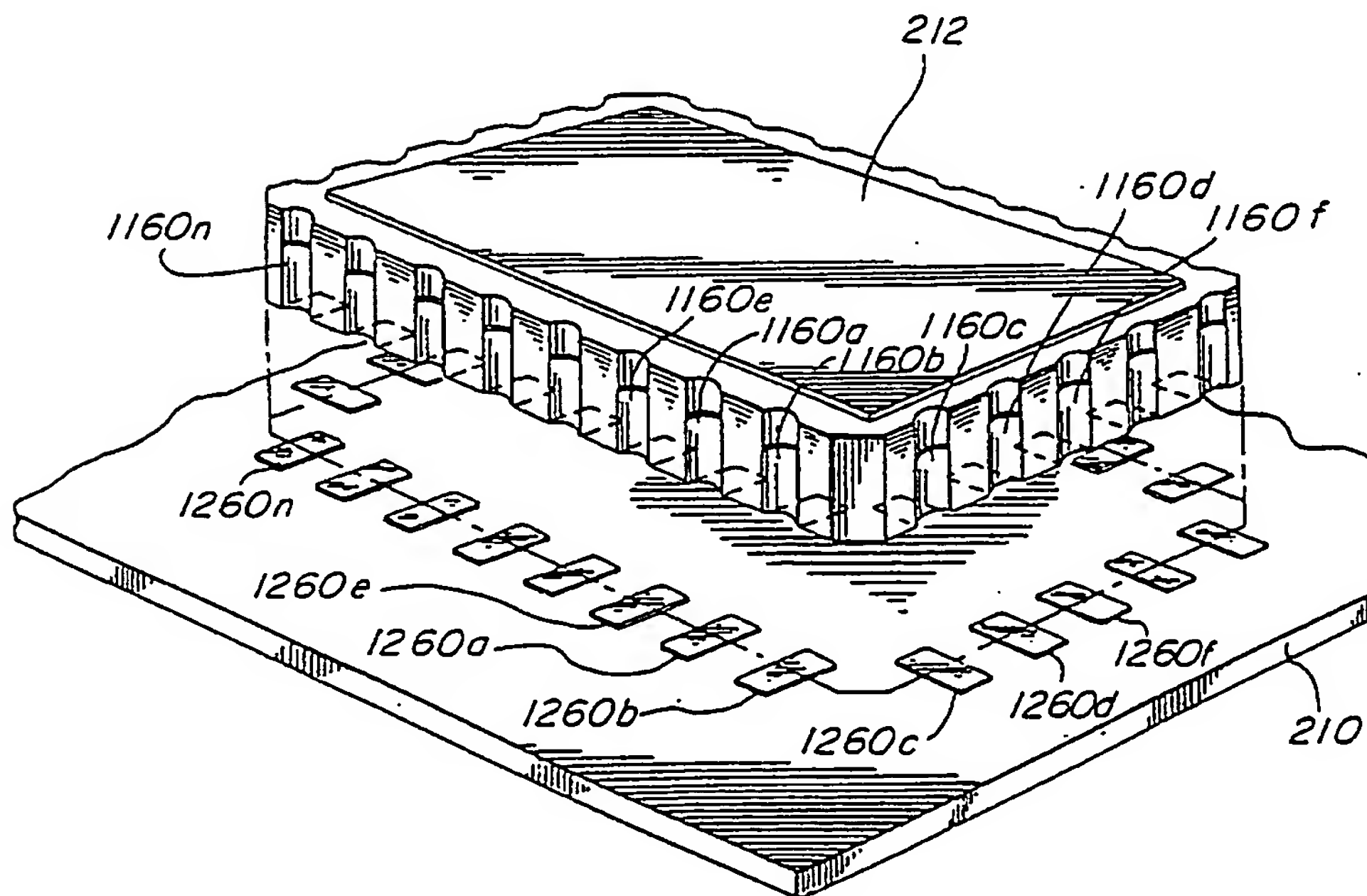


FIG. 16



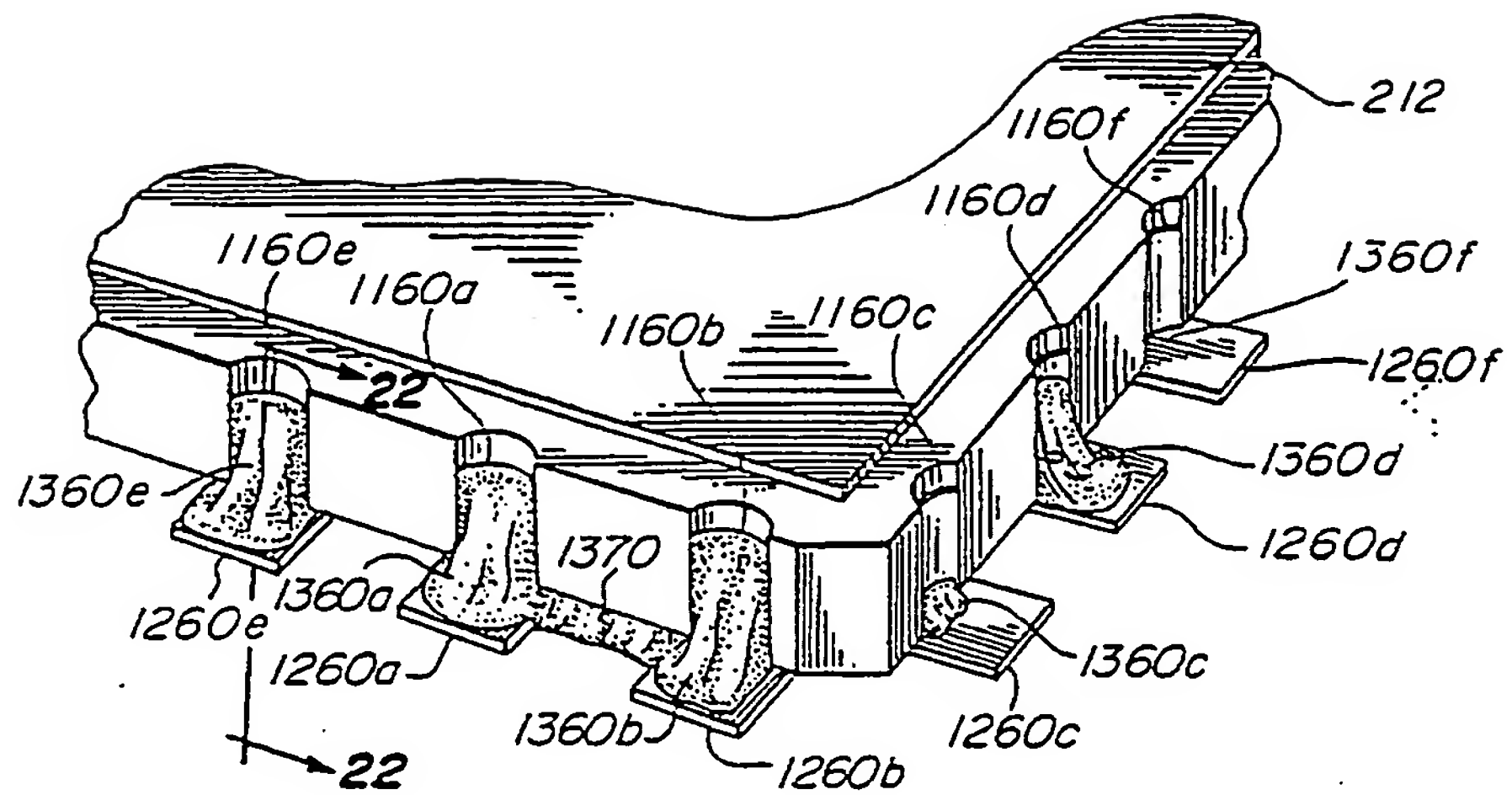


FIG. 17

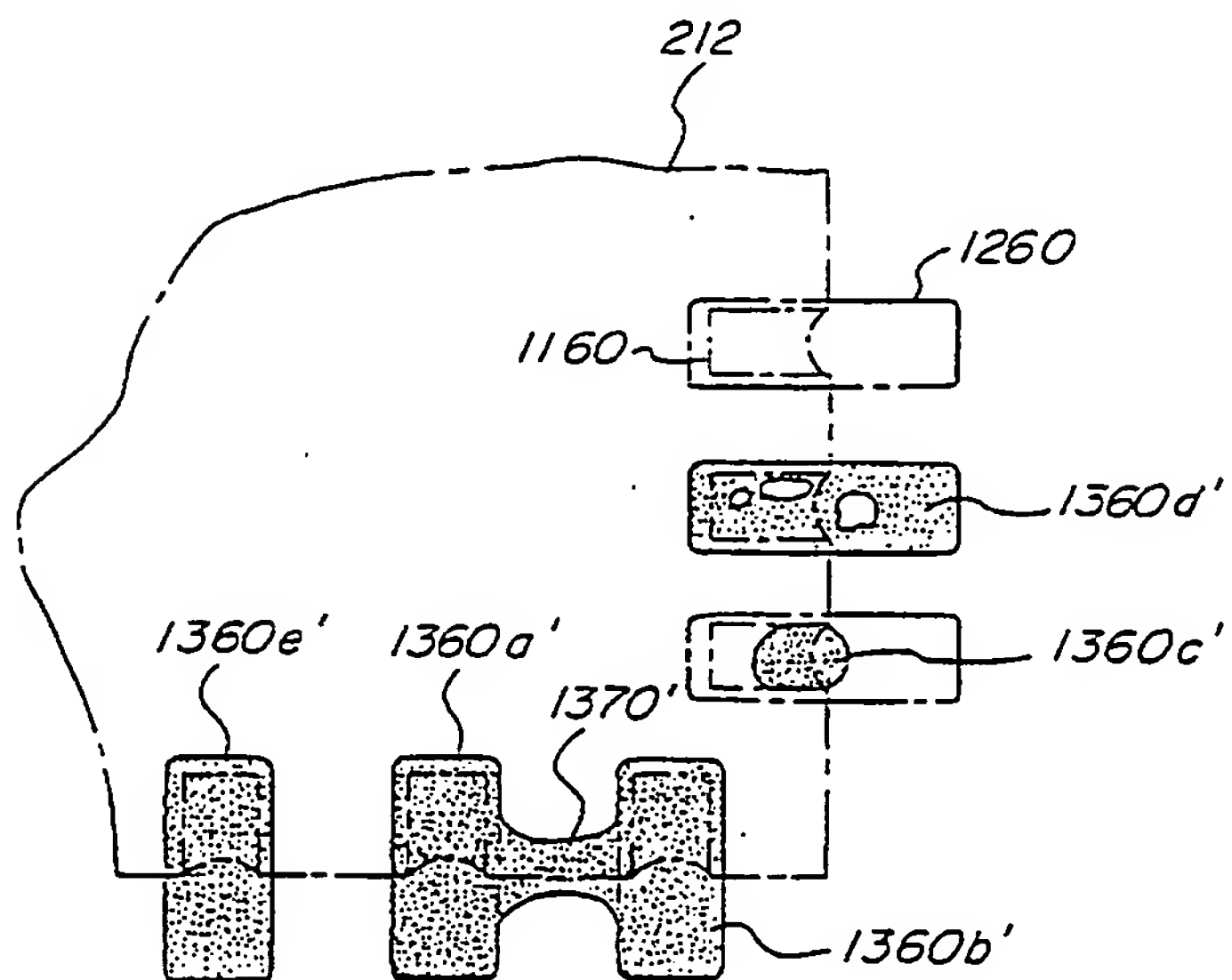
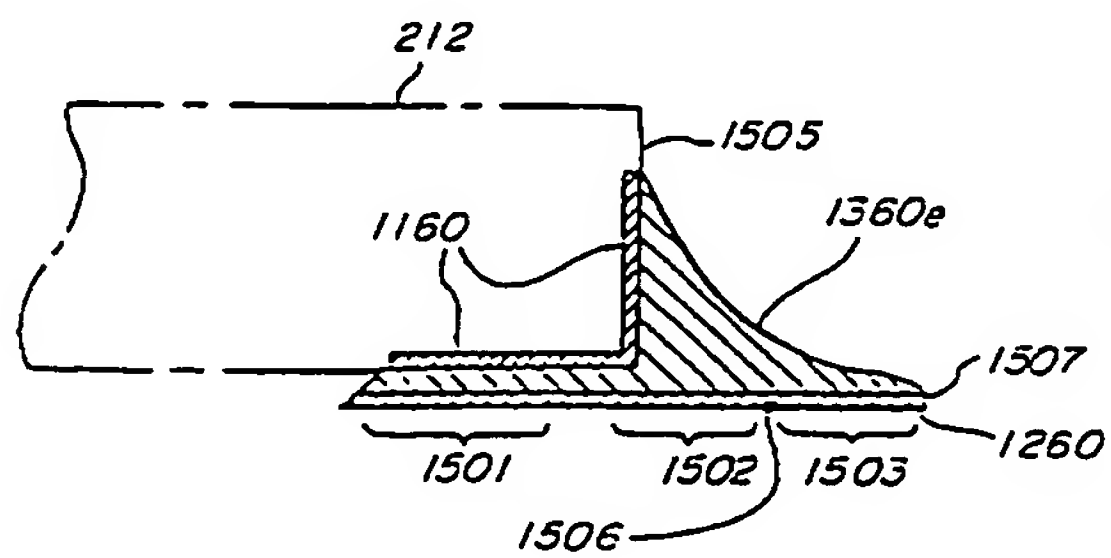
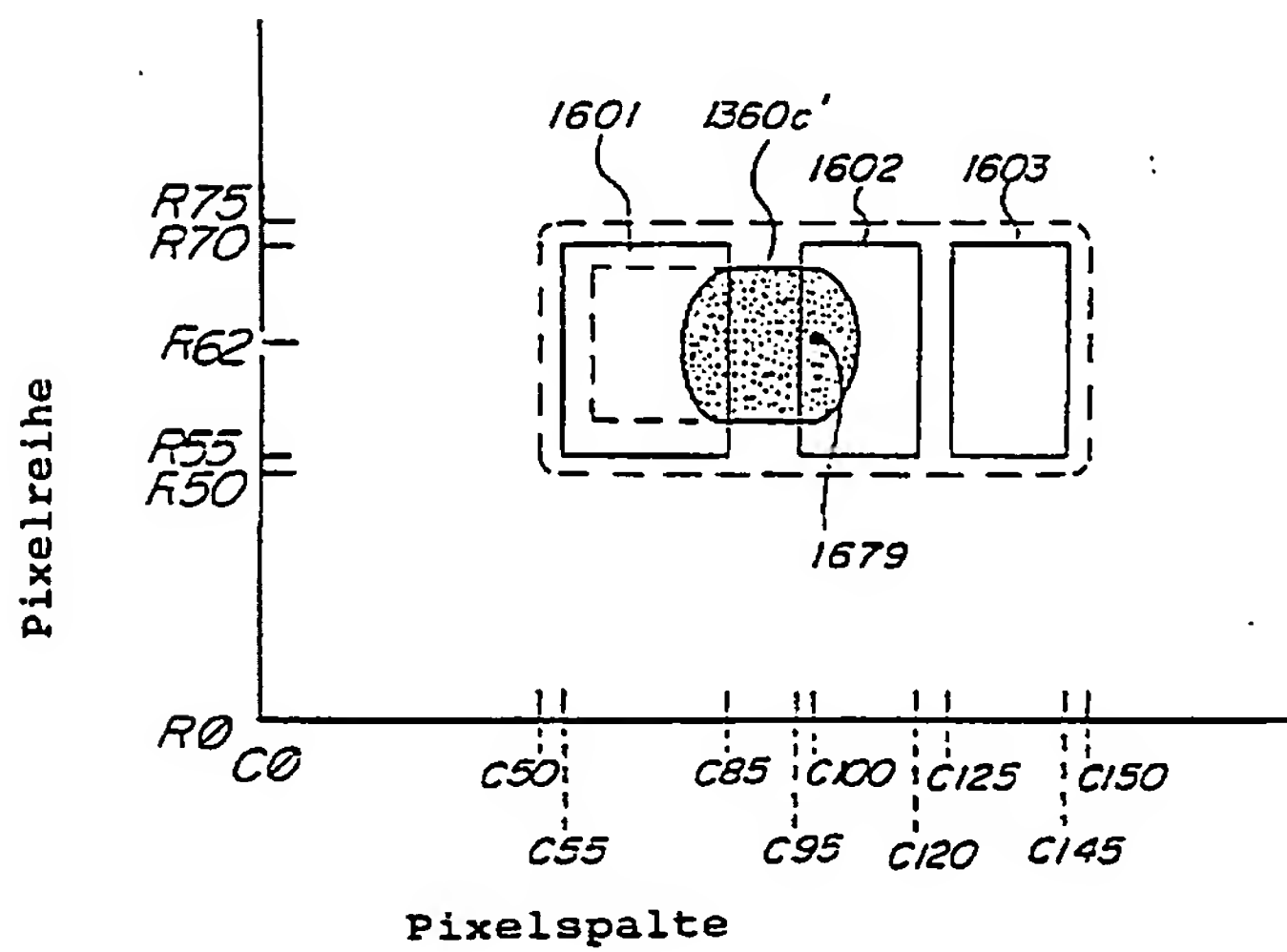
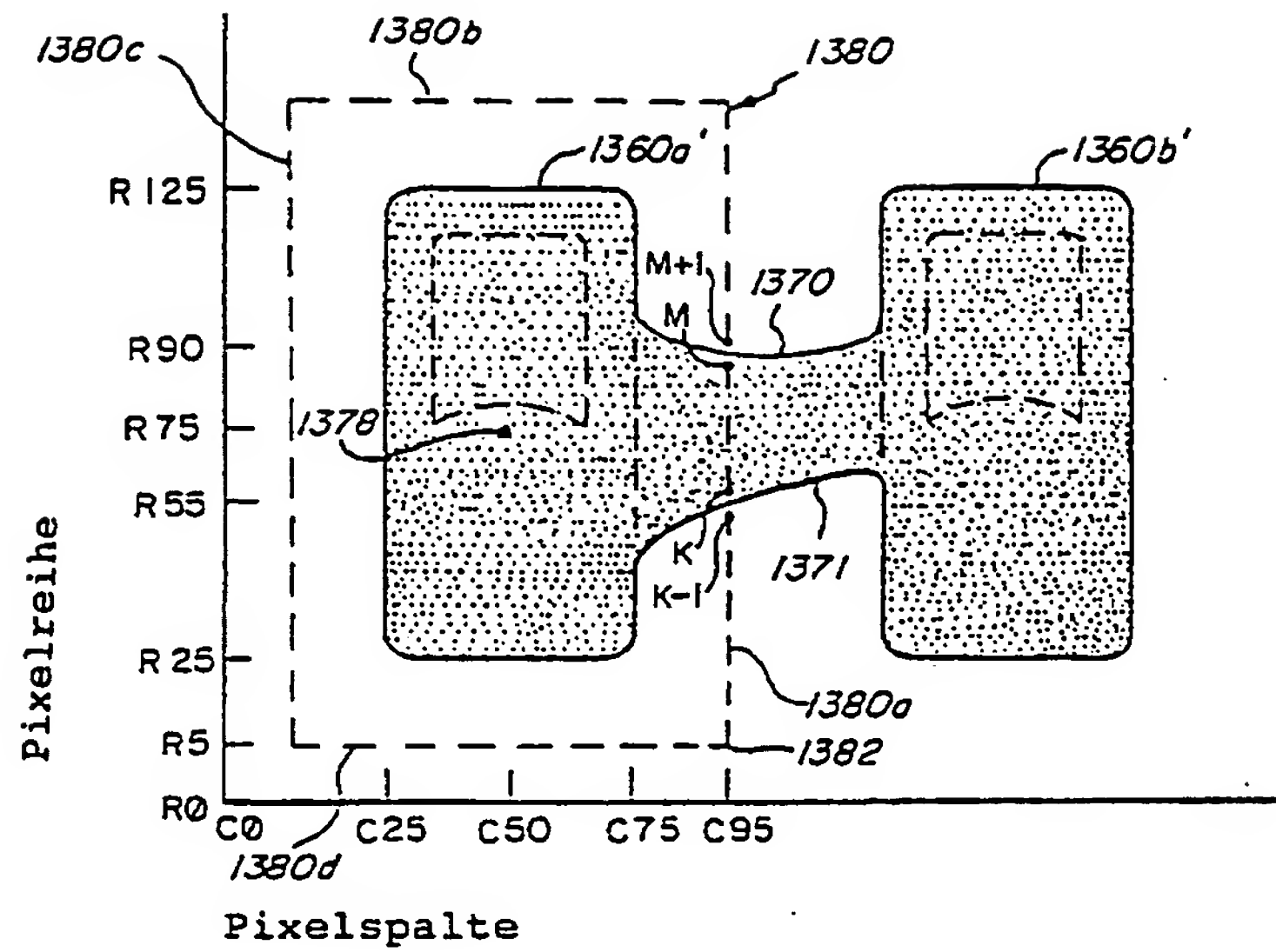


FIG. 18





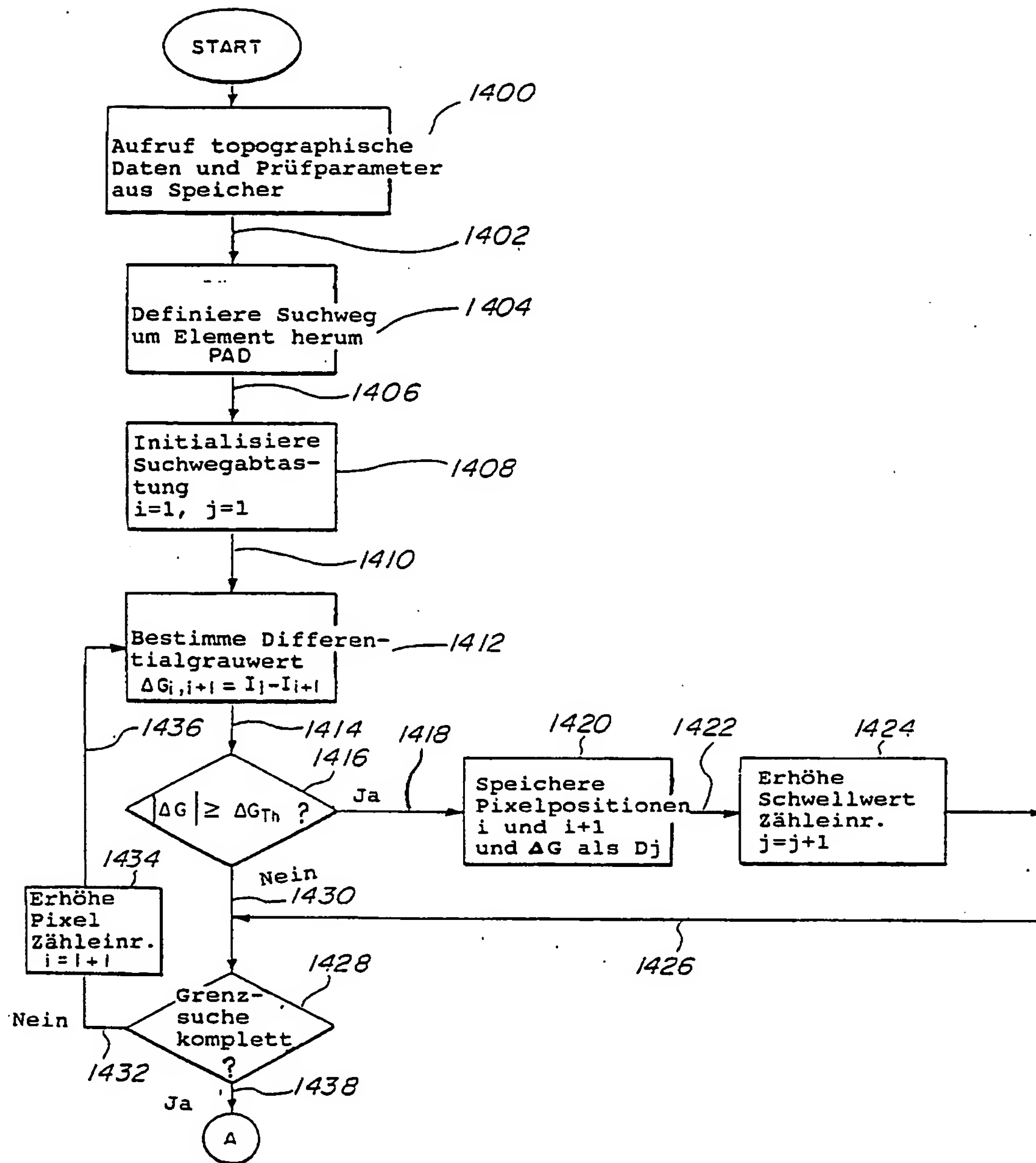


FIG. 20a

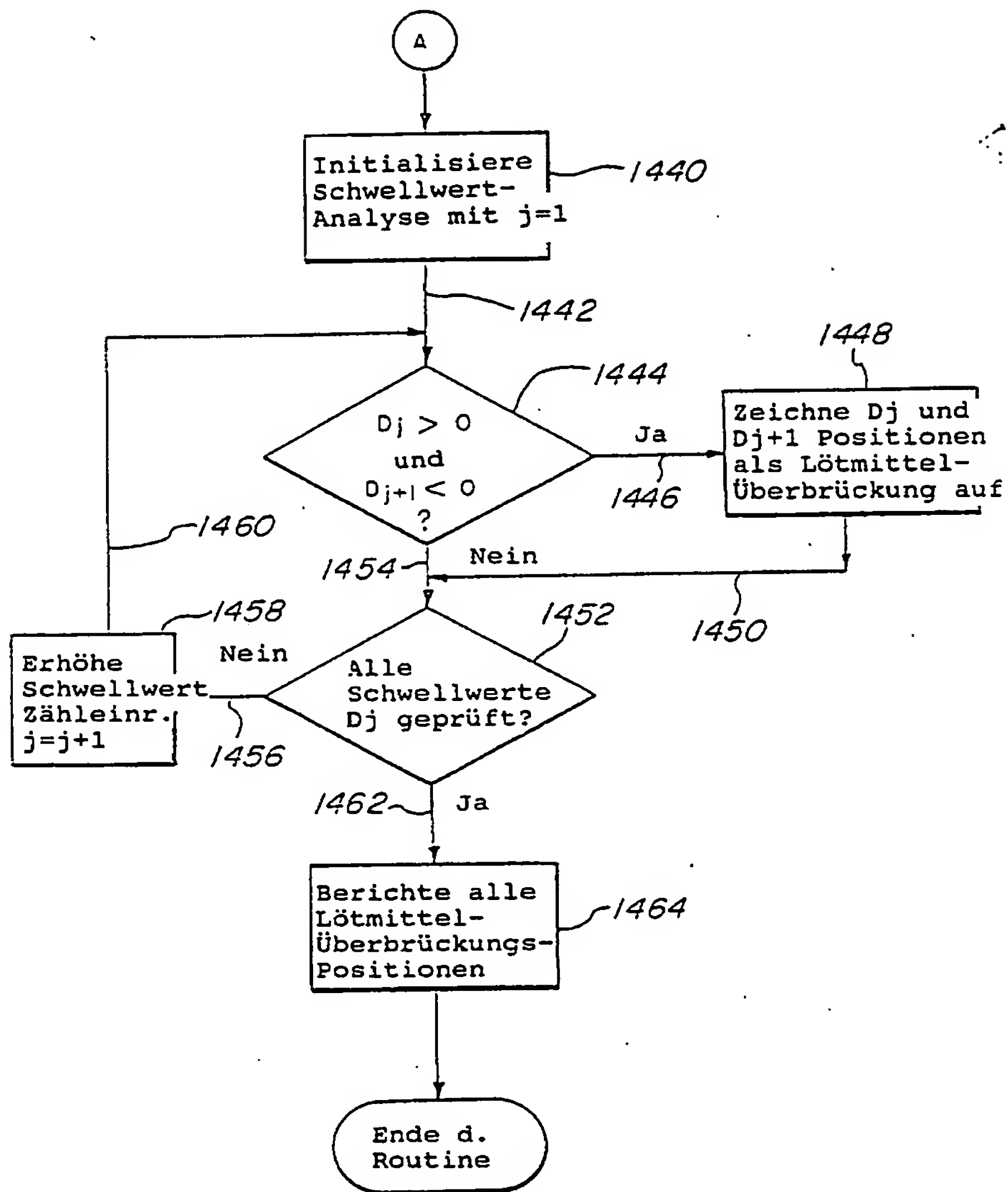


FIG. 20b

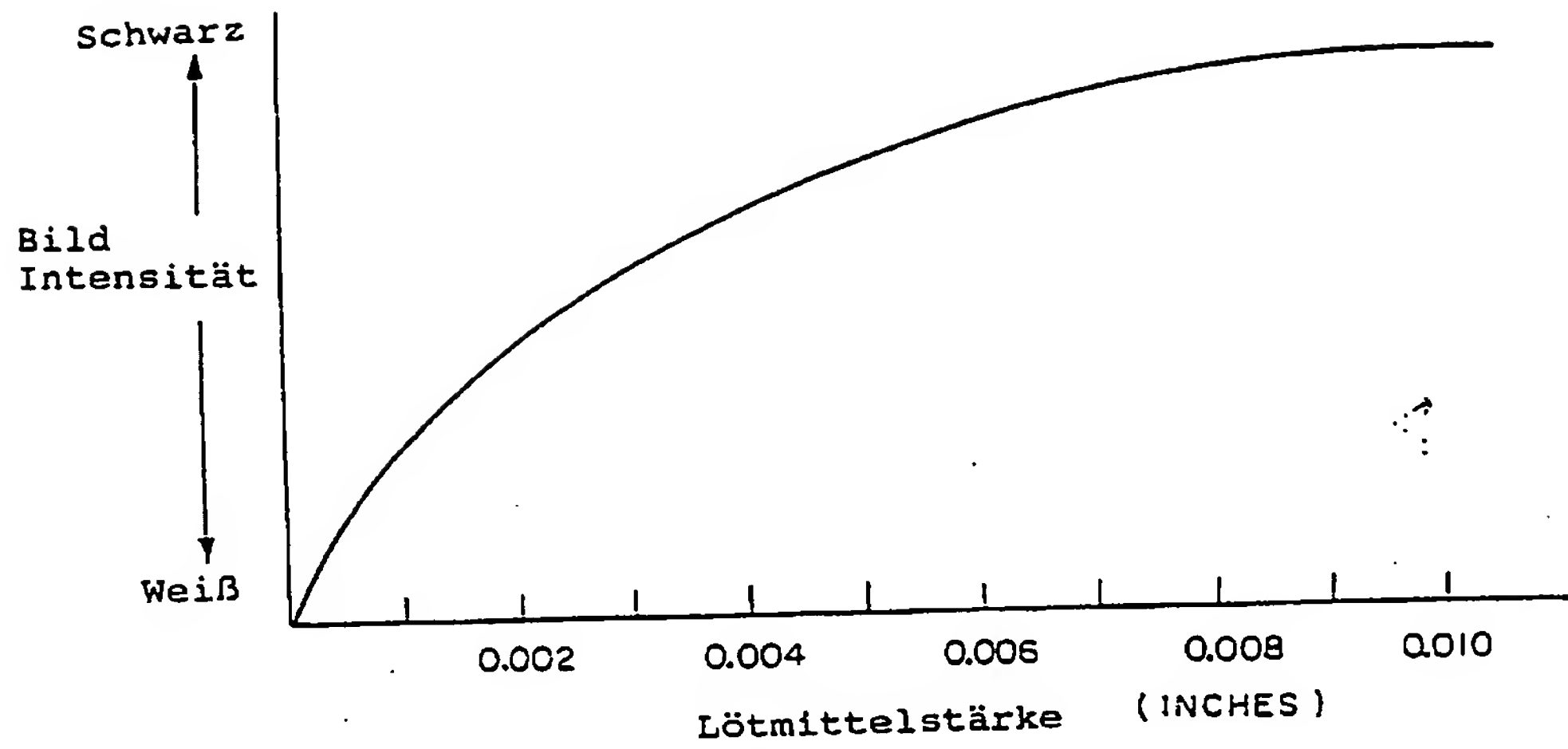


FIG. 23a

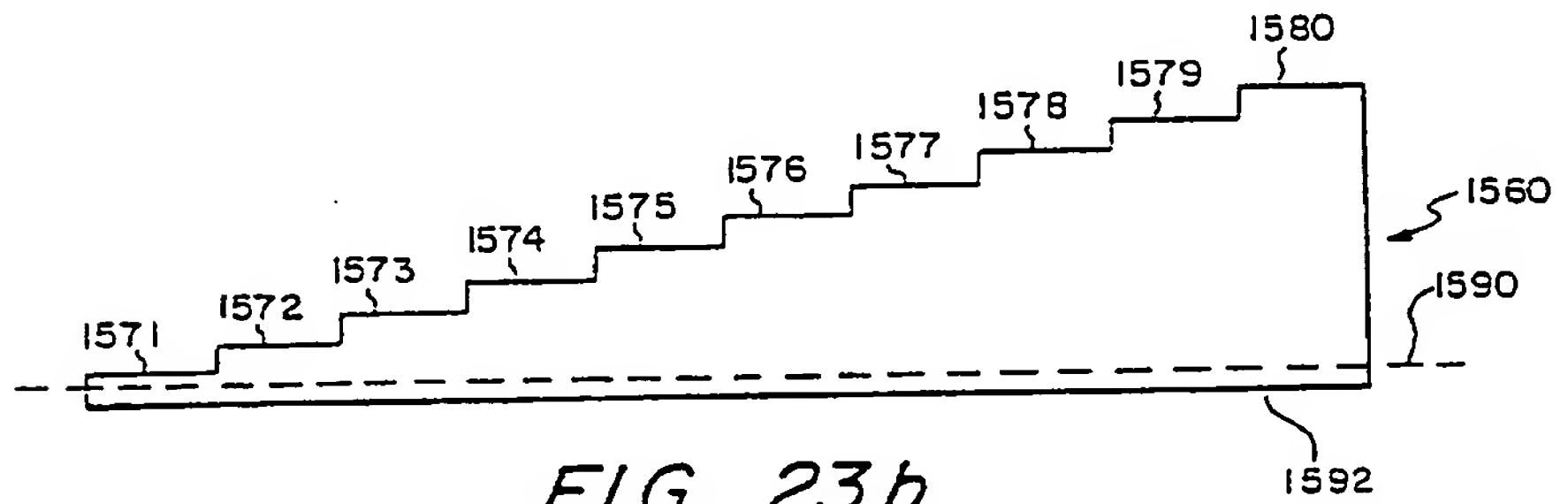


FIG. 23b

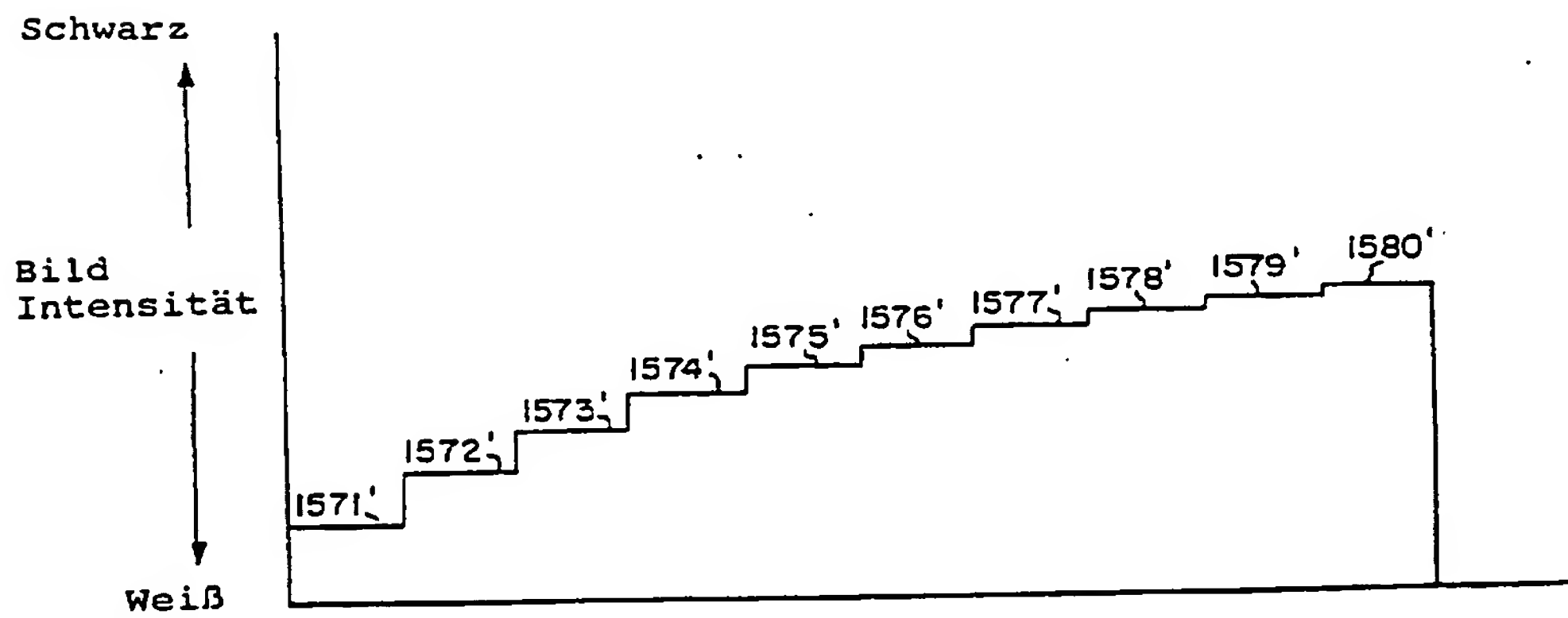
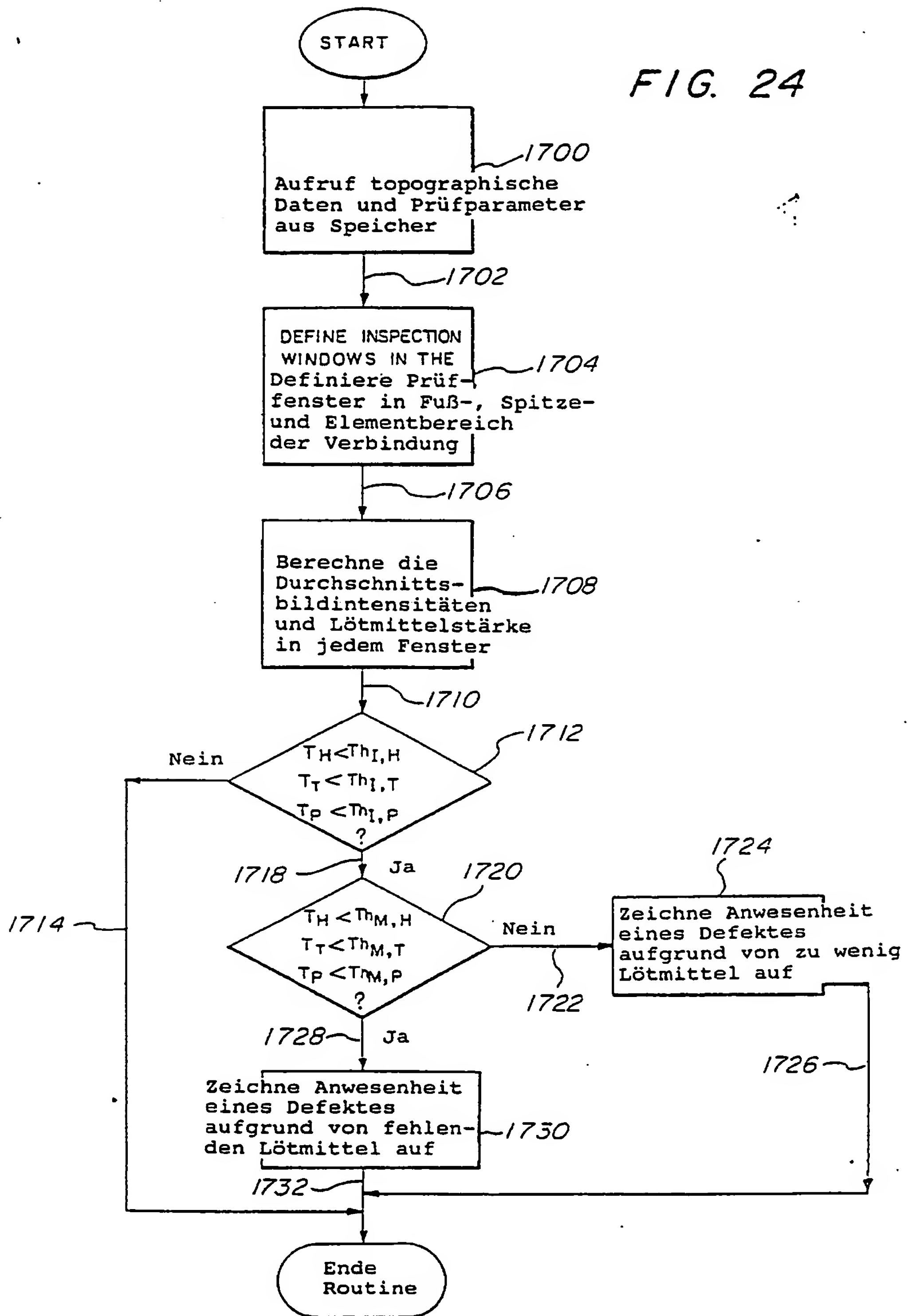


FIG. 23c

FIG. 24



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**